

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Návrh silové regulace lineárního servopohonu
Proposal of Hydraulic Power Control Circuit with
Proportional Valve

Student: Bc. Martin Mazáč
Vedoucí diplomové práce: Ing. Erik Stonawski, Ph.D.

Ostrava 2010

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě :

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3)
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše)
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby

V Ostravě :.....

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Mazáč

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Karviná - Ráj, Na Výsluní 7/45

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

MAZÁČ, M. *Návrh silové regulace lineárního servopohonu : diplomová práce.* Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2010, 50 s. Vedoucí práce: Stonawski, E.

Diplomová práce je zaměřena na návrh silové regulace lineárního servopohonu, který je instalovaný v laboratoři katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení. V kapitole č. 1 je uveden přehled současného stavu řešené problematiky, ve které je popsán regulační obvod. Popis silového servomechanismu je předmětem kapitoly č. 2. Kapitola č. 3 obsahuje nastavení digitální karty VT - HACD pomocí programu BODAC. V kapitole č. 4, měření dynamického chování servomechanismu je popsáno vlastní měření, změny zesílení proporcionálního regulátoru P a integračního regulátoru I . Výsledkem měření jsou grafy, které jsou rovněž součástí této kapitoly. Závěrečná kapitola č. 5 pojednává o porovnávání skutečných výsledků s výsledky simulačními. Pro simulaci byl použit simulační systém pro hydraulické válcové pohony s ventilovým řízením HYVOS 7.0.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

MAZÁČ, M. *Proposal of Hydraulic Power Control Circuit with Proportional Valve : Master Thesis.* Ostrava : VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulics Equipment, 2010, 50 p. Thesis head: Stonawski, E.

Master thesis is targets the *Proposal of Hydraulic Power Control Circuit with Proportional Valve* that is installed in laboratory department of Hydromechanics and Hydraulics Equipment. In the first chapter is stated the present status of problems of servo - driver, in that's described control loop. Software BODAC is examined in the third chapter and it served as set - up VT - HACD card. The metering of dynamic servo - driver and self metering are described in the fourth chapter, the changes of the boost proportional controller P and integrative controller I are shown as well. Results of the metering are diagrams and they are the part of this chapter. The last chapter deals with the comparison of the real results with the simulation's results. The simulating system was used for simulation for hydraulics roller power with valve's drive HYVOS 7.0.

Obsah

	strana
Seznam použitého značení a symbolů	1
Úvod	3
1 Přehled současného stavu řešené problematiky	4
1.1 Uzavřený regulační obvod	4
1.2 Rozdělení servomechanismů	5
1.3 Typické znaky servomechanismů	5
1.4 Požadavky na servomechanismus	5
1.5 Regulační obvod k silové regulaci	6
2 Popis silového servomechanismu instalovaného v laboratoři	8
2.1 Popis jednotlivých komponentů hydraulického a regulačního systému	9
2.1.1 Lineární hydromotor	10
2.1.2 Snímač polohy	11
2.1.3 Tlakový snímač	12
2.1.4 Proporcionální rozváděč	13
2.1.5 Zdroj tlaku	18
2.1.6 Řídící elektronika pro proporcionální ventily	19
2.1.7 Ovládací pult karty VT - HACD	24
2.2 Šroubovitě tlačné pružiny	26
3 Nastavení digitální řídicí karty VT - HACD	27
3.1 Software BODAC	27
4 Měření dynamického chování lineárního servopohonu	31
4.1 Měření při změnách regulátoru P	31
4.1.1 Výsledky měření při změnách zesílení regulátoru P	34
4.2 Měření při změnách regulátoru I	37
4.2.1 Výsledky měření při změnách zesílení regulátoru I	37
5 Porovnání naměřených výsledků s výsledky simulace	40
5.1 Simulační model regulačního obvodu v simulačním systému HYVOS 7.0	40
5.2 Výsledky simulace pro tlakovou regulaci se změnami parametrů P složky	41
5.2 Výsledky simulace pro silovou regulaci se změnami parametrů P složky	43
6 Závěr	45
7 Seznam použité literatury	48
8 Seznam příloh	50

Seznam použitého značení

Značka	Název	Jednotky
D	střední průměr pružiny	m
e	regulační odchylka	1
I_{max}	maximální proud	A
k_1	tuhost vnější pružiny	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
k_2	tuhost vnitřní pružiny	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
k	výsledná tuhost pružin	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
l	jmenovitá délka	m
m	hmotnost	kg
p_1	minimální pracovní tlak	Pa
p_2	maximální pracovní tlak	Pa
p	destruktivní tlak	Pa
p_p	provozní tlak	Pa
Q_N	jmenovitý průtok	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
r	poloměr	m
R_e	vstupní odpor	Ω
R_{min}	zátěž	Ω
t	teplota	$^{\circ}\text{C}$
Δt	doba vzorkování	s
T_{max}	časová konstanta náběhové rampy	s
u	akční veličina	1
U	výstupní napětí	V
U_B	provozní napětí	V
$u_B(t)$	funkční rozsah	V
v	poruchová veličina	1
v	maximální rychlost válce	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
V_0	efektivní objem plynu akumulátoru	m^3
V_g	geometrický objem	m^3
V_N	objem nádrže	m^3
y	regulovaná (výstupní) veličina	1
w	žádaná (vstupní) veličina	1
θ	přípustná oblast provozních teplot	$^{\circ}\text{C}$
ν	viskozita	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Zkratky

<i>AI</i>	analogový vstup
<i>AO</i>	analogový výstup
<i>BG 1</i>	spínač
<i>BODAC</i>	Bosch Rexroth Operator interface for Digital Axis Controller
<i>CI</i>	externí žádost
<i>CMD1</i>	součet vnitřních a vnějších žádostí
<i>d 1</i>	relé
<i>DI</i>	digitální vstup
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung
<i>DO</i>	digitální výstup
<i>FB1</i>	upravený signál zpětné vazby
<i>HACD</i>	Hydraulic Axis Controller Digital
<i>LC1</i>	aktuální žádost polohy válce včetně aktuální rychlosti
<i>LC1 - LFB1</i>	regulační odchylka
<i>LO1</i>	výstup z regulátoru
<i>Out 1</i>	výstupní signál přímo na proporcionální rozváděč
<i>PČ</i>	porovnávací člen
<i>PID</i>	proporcionálně, integračně, derivační složka
<i>PTFE</i>	polytetrafluoretylen
<i>R</i>	regulátor
<i>RA 1</i>	generátor rampové funkce
<i>RS</i>	regulovaná soustava
<i>SSI</i>	digitální měřicí systém
<i>SR</i>	servozesilovač
<i>T1 Lag</i>	časová konstanta

ÚVOD

Začátkem padesátých let se v letectví začaly používat k ovládání kormidel a klappek elektrohydraulické servoventily. K výhodám servoventilů patří výborné dynamické vlastnosti. Vyrábějí se výlučně s ostrohranným šoupátkem. Dosahují frekvenčního rozsahu až 500 Hz. Nevýhodou jsou vysoké požadavky na čistotu kapaliny a vysoká cena. Kvůli těmto nevýhodám jsou servoventily používány pouze u nejnáročnějších aplikací. Pro průmyslové aplikace se jedná o drahé řešení a proto byla hledána levnější náhrada, byť s horšími dynamickými vlastnostmi.

V sedmdesátých letech byly vyvinuty proporcionální ventily. V dnešní době se některé již svými dynamickými vlastnostmi blíží servoventilům a takovéto ventily se dnes nazývají proporcionální regulační ventily. Mezi proporcionální technikou a servotechnikou existuje plynulý přechod. K vlastnostem proporcionálních regulačních ventilů patří zejména vhodnost pro regulační obvody se zpětnou vazbou. Nároky na čistotu kapaliny jsou shodné jako u konvenční spínací techniky, ekonomicky jsou dostupnější oproti servoventilům. Proportionální hydraulika dosáhla toho, že pracuje klidně i přes velké pohybující se hmoty (např. svářecí linka pro výrobu dílů karoserie), vysoké hodnoty zrychlení a rychlosti. Díky těmto vlastnostem zaujala proporcionální technika v krátké době významné místo v hydraulických pohonech.

K rozšířenému používání proporcionální techniky přispěl také vývoj funkčně spolehlivých a jednoduchých elektronických karet rozměrů evropského formátu.

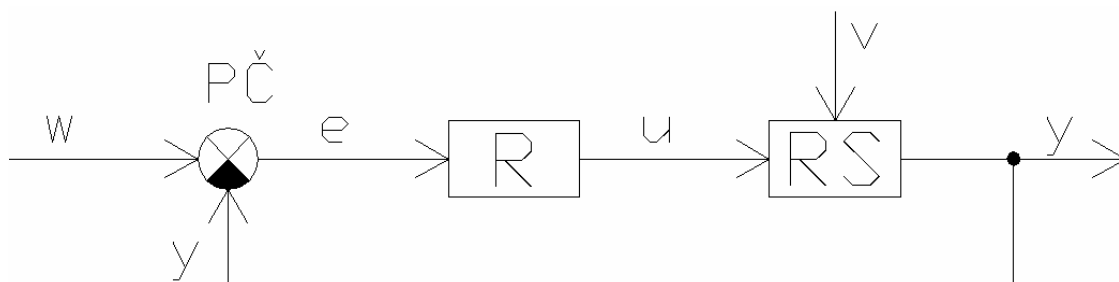
Řízení síly / tlaku, rychlosti, případně polohy elektrickým signálem umožňuje umístění proporcionálních ventilů přímo u pohonu pomocí přípojovací kostky. Tím se zlepšují dynamické vlastnosti hydraulického obvodu.

Cílem diplomové práce je zprovoznit silový / tlakový servomechanismus, který se skládá z lineárního hydromotoru a přímo řízeného proporcionálního rozváděče, který je řízen digitální kartou. Zpětnou vazbu zajišťuje tlakový snímač připojený přímo v regulačním kanále na přípojovací kostce servopohonu.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

1.1 Uzavřený regulační obvod

V regulačním obvodu je stále měřena regulovaná veličina a porovnávána se žádanou hodnotou. Pokud vznikne mezi oběma hodnotami rozdíl vyvolaný poruchovou veličinou, je regulátorem provedeno přestavení tak, že je opět dosaženo shody regulované veličiny se žádanou hodnotou. Na obr. 1 je znázorněno uspořádání regulačního obvodu.



Obr. 1 Uspořádání regulačního obvodu

w - žádaná (vstupní) veličina, e - regulační odchylka, $e = w - y$, u - akční veličina,
 v - poruchová veličina, y - regulovaná (výstupní) veličina, R - regulátor,
 RS - regulovaná soustava, $PČ$ - porovnávací člen

Hlavní úlohou regulace je vyloučení vlivu poruchové veličiny na regulovanou veličinu. Regulační obvod je rovněž určen k tomu, aby při změně žádané hodnoty upravil skutečnou hodnotu regulované veličiny na hodnotu shodnou s novou žádanou hodnotou.

Regulace má dvě úlohy:

- odstranění vlivu poruch
- sledování vstupní veličiny regulovanou veličinou

Jednotlivé úseky regulačního obvodu, tj. „regulovaná soustava“ a „regulátor“ jsou „členy regulačního obvodu“. Obecně jsou znázorňovány formou obdélníkových bloků popsaných přenosy. Spojením jednotlivých bloků vytvoříme blokové schéma, kde tok signálu je označen čarami a šipkami. Příklad blokového schématu je uveden na obr. 1. Regulovanou soustavou se nazývá technologické zařízení, na němž má být určitá fyzikální veličina stabilizována. Přístrojové vybavení, zajišťující regulační činnost se nazývá regulátor. Mezi regulovanou soustavou a regulátorem dochází ke sdílení informací.

Regulovat můžeme sílu / tlak, rychlost a polohu. Podle toho hovoříme o silovém / tlakovém (obr. 3), rychlostním a polohovém servomechanismu.

1.2 Rozdělení servomechanismů

- *polohové* - jsou nejrozšířenější a používají se například u obráběcích strojů k řízení vzájemné polohy nástroje a obrobku, k ovládání kormidel u letadel, lodí a raket, k nastavování polohy ventilů a šoupátek u energetických zařízení.
- *rychlostní* - používají se v případech, kde je vyžadována konstantní rychlost nebo otáčky nezávislé na zatížení. Například hlavní pohon vřetene u moderních obráběcích strojů s plynulou volbou otáček (které mají být nezávislé na zatížení řeznou silou).
- *silové / tlakové* - jsou velmi podobné polohovým. Hlavními oblastmi jejich použití jsou simulátory zatížení a stroje pro trhací a únavové zkoušky průmyslových zkušeben, ale i posilovače řízení a brzd u dopravních prostředků.

1.3 Typické znaky servomechanismů

- vstupním signálem je mechanický pohyb s minimálním silovým působením nebo slabý elektrický signál
- výkonovým členem je motor
- záporná zpětná vazba, která slouží k vyvození regulační odchylky odečtením výstupního signálu od vstupního
- malý výkon na vstupu a velký výkon na výstupu předpokládá říditelný zdroj energie přiváděné k servomechanismu z vnějšku

1.4 Požadavky na servomechanismus

Prvotním předpokladem pro splnění požadavků na přesnou a rychlou činnost je dynamická stabilita. Dynamická stabilita je, zjednodušeně řečeno, odolnost servomechanismu proti rozkmitání (řídícím signálem, poruchami, apod.).

Aby byla zajištěna rychlá reakce servomechanismu, je zapotřebí dosáhnout velké zesílení celé smyčky. Velkým zesílením je příznivě ovlivněna i přesnost, neboť potom i malé odchylky od požadované hodnoty výstupu jsou převedeny na signál dostatečné úrovně, aby obvod tuto odchylku vyrovnal. Velké zesílení však zhoršuje dynamickou stabilitu. Optimální návrh zesílení je vždy kompromisem mezi požadavkem vysoké přesnosti a rychlosti na jedné straně a dynamické stability na straně druhé.

S přesností úzce souvisí i odolnost obvodu proti vnějším poruchovým signálům, kterými jsou hlavně třecí odpory mechanismů, necitlivost, hystereze prvků, jevy nasycení a driftы signálů. Mezi poruchové signály patří také vnější zátěžná síla, jejíž vliv na přesnost servomechanismu má být co nejmenší.

- *třecí odpory* způsobují nespojitý přechod z tření v klidu na tření v pohybu. Jsou příčinou nerovnosti chodu při malých rychlostech a dochází při nich ke vzniku trhavých pohybů („*Stick - slip* efekt“). Proto, pokud je to možné, upřednostňujeme valivé uložení před kluzným.
- *necitlivost* může být způsobena nepřesnou výrobou (např. hran šoupátek) nebo prahovým napětím polovodičových prvků
- *hystereze* je způsobena nejčastěji vůlemi v mechanických převodech, zbytkovým magnetismem v magnetickém obvodu servoventilu a třením
- ke stavu *nasycení* dochází při překročení napájecích napětí, tlaků, průtoku a zdvihů. Je to režim, ve kterém zaniká platnost regulačních principů.
- *drifty signálů* nejčastěji souvisejí se změnami teploty v systému, ale i se změnami napájecího i odpadního tlaku a se stářím prvků (únavou materiálu). Kompenzujeme je například nenulovým napětím signálu na vstupu do zesilovače signálu.

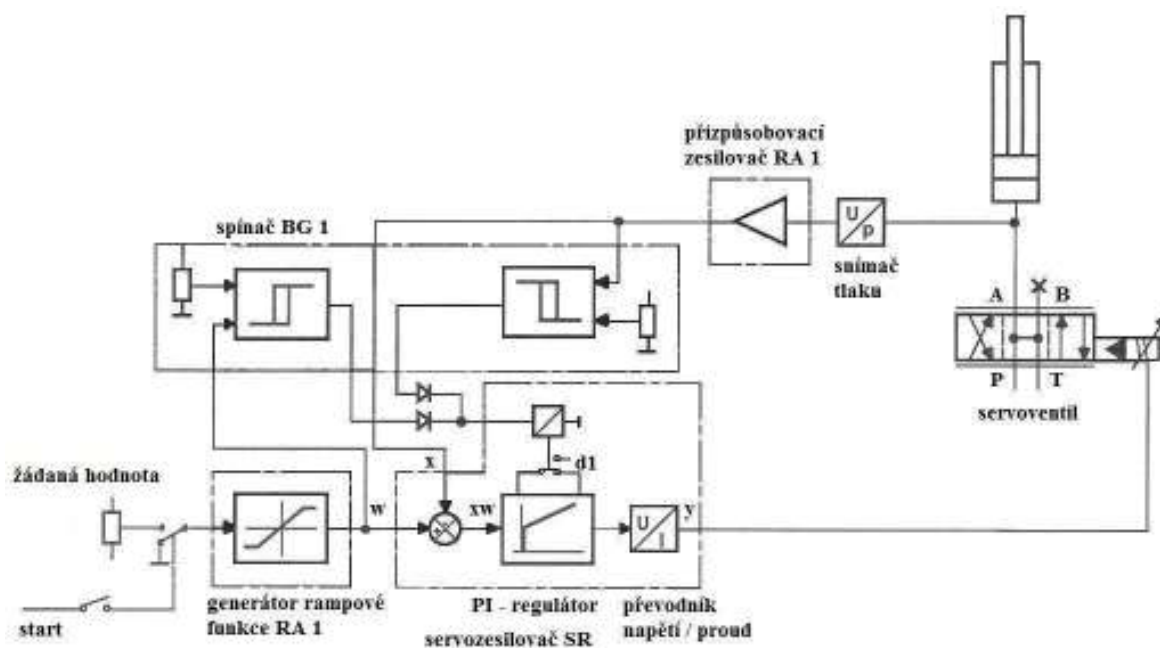
1.5 Regulační obvod k silové / tlakové regulaci

Všeobecně k regulačnímu obvodu pro regulaci síly / tlaku se servoventilem pro řízení průtoku (obr. 2):

Do té doby, dokud není požadován průtok pro korekci poruchy, pracuje ventil kolem nulového bodu. Za těchto podmínek je dosažitelné zesílení regulačního obvodu určeno ventilem.

Prostřednictvím tlakového snímače je přenášena informace o tlaku v přímočarém hydromotoru, a prostřednictvím řídicího ventilu regulátor určuje škrcení a větvení průtoku.

Hydraulický regulační obvod pro silovou / tlakovou regulaci plní jako svoji základní funkci řízení síly / tlaku vyvozované zpravidla přímočarým hydromotorem - hydraulickým válcem. Odměrování vyvozované síly se provádí buď přímo, silovým čidlem, nebo nepřímo například u tvářecích strojů odměrováním deformace. Silový servomechanismus potom vlastně nereguluje sílu, ale deformaci. Signálem o velikosti přitlačné síly je údaj o tlaku v hydraulickém válci měřený snímačem tlaku. Údaj o velikosti přitlačné síly, respektive tlaku, je zpracován v korekčním členu - zesilovači.



Obr. 2 Schéma regulačního obvodu pro silovou / tlakovou regulaci

Průběh signálu

Po zapnutí ovladače „start“ (obr. 2) je připojen potenciometr s nastavenou hodnotou síly / tlaku na generátor rampové funkce RA 1. V závislosti na nastavené časové konstantě zvyšuje rampový generátor výstupní signál z nulové hodnoty napětí na hodnotu vstupního signálu. Výstupní signál rampového generátoru je přiveden na servozesilovač SR (obr.2). Síla pístu je odměřována snímačem tlaku. Signál tlaku je v přizpůsobovacím zesilovači upraven tak, aby byl porovnatelný se signálem žádané hodnoty.

Řídicí signál je 0 - 10 V. Přizpůsobení signálu skutečné hodnoty tedy znamená, že signál skutečné hodnoty bude při maximální žádané hodnotě 10 V. Přizpůsobený signál skutečné hodnoty (síly / tlaku) je přiveden na servozesilovač SR.

V servozesilovači je provedeno porovnání žádané a skutečné hodnoty a vzniklá regulační odchylka e je přivedena na regulátor. Ten vytváří akční signál u , který přímo řídí servoventil (obr. 2) tak, že je přizpůsobena skutečná hodnota síly / tlaku hodnotě žádané.

Regulátor mění výstupní napětí tak dlouho, až je nulový rozdíl žádané a skutečné hodnoty. K zamezení driftu regulátoru a k zamezení poskoku pohonu v době po startu je regulátor uveden v činnost spínačem až po startovacím povelu.

Při sepnutém relé d1 je regulátor v normální činnosti. Při odpadnutí relé d1 je zkratována zpětná vazba operačního zesilovače, a tím je výstupní signál u roven nule

(zesílení je rovno nule). Spínačem BG 1 je uveden regulátor v činnost v závislosti na hodnotě vstupního signálu. Spínač je nastaven tak, aby regulátor byl v činnosti při vstupním signálu cca 100 mV.

2 POPIS SERVOMECHANISMU INSTALOVANÉHO V LABORATOŘI

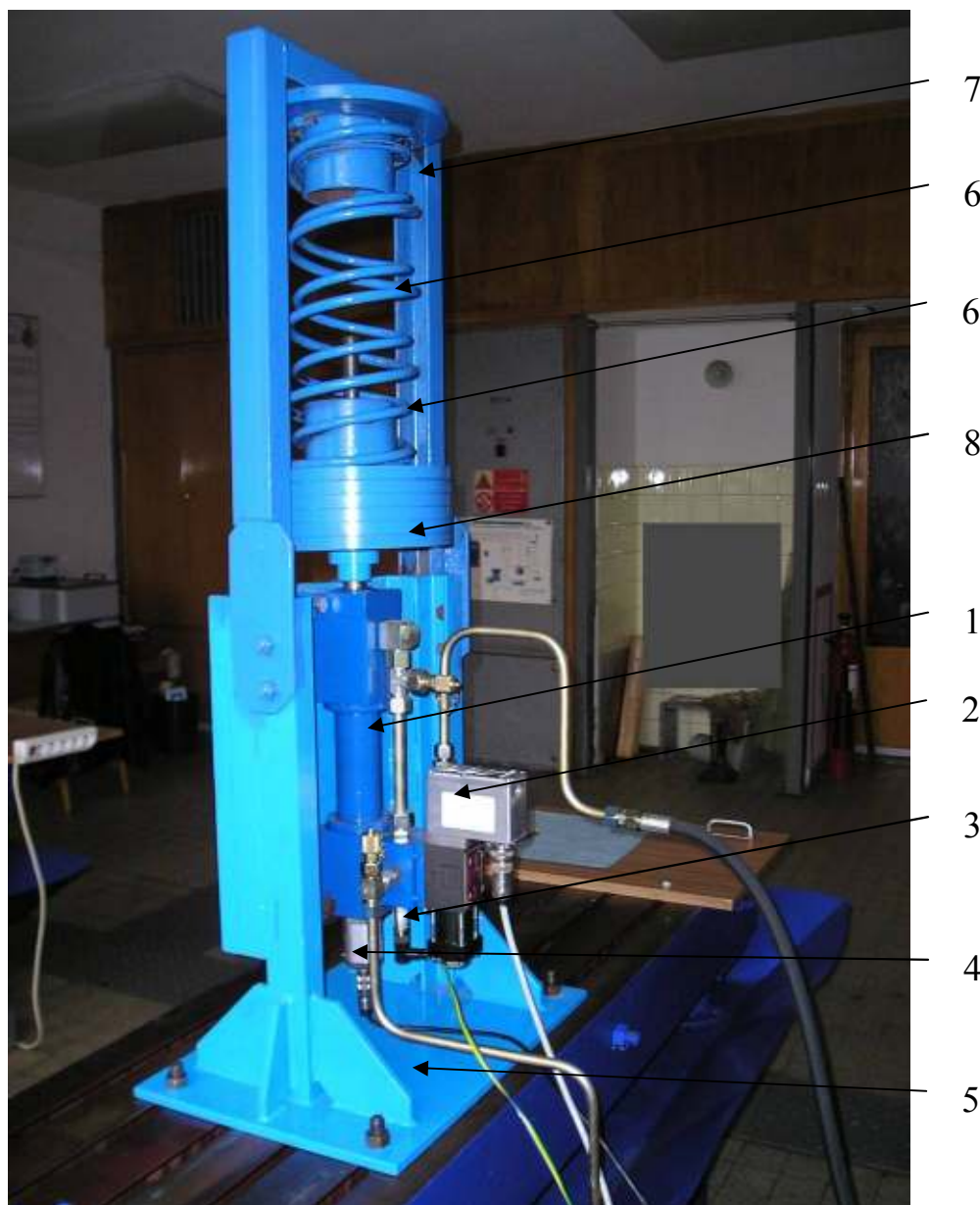
Základním členem konstrukce jsou svisle umístěné U - profily na podstavné desce, pomocí které je celé zařízení upevněno na stůl v laboratoři katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení (obr. 3). U - profily jsou ze tří stran zpevněny vzpěrami, aby nedocházelo k nežádoucímu ohýbání profilů. Samotný hydromotor je připevněn k desce, která je přivařena k U - profilům. Tato konstrukce vystačila k polohové regulaci, která byla předmětem mé bakalářské práce.

K silové regulaci je zapotřebí systém doplnit o další mechanickou část (obr. 3). Jejím základem jsou tři U - profily, z nichž dva jsou přišroubovány svisle k předchozí konstrukci, tím také zvětšují celkovou výšku systému. Zbývající U - profil je přivařen vodorovně mezi svislé U - profily na jejich opačném konci. K tomuto profilu je přivařen kotouč s trubicí (horní miskou), která bude bránit možným nežádoucím pohybům pružin, vznikajících při pohybu válce. Na šroubovém konci pístnice je nasazeno závaží ve formě 6 kotoučů (jeden kotouč váží 5 kg). Na posledním kotouči je rovněž přivařena trubka (dolní miska), sloužící také k udržení pružin.

Pro silovou / tlakovou regulaci je nutné do systému instalovat pružiny. Zvolil jsem dvě tlačné pružiny o různých tuhostech (obr. 3). Tuhost pružiny k udává velikost síly která způsobí jednotkovou deformaci (stlačení) pružiny. Přibližná tuhost vnější pružiny je $k_1 = 19,5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$, vnitřní pružina o menším středním průměru D má přibližnou tuhost $k_2 = 17 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$. Vzhledem k tomu, že deformace obou pružin je stejná, výsledná tuhost k je dána součtem dílčích tuhostí:

$$k = k_1 + k_2 = 19,5 + 17 = \underline{\underline{36,5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}}}$$

K výpočtu jsem použil hodnoty zjištěné z katalogu pro tlačné pružiny z pružinové oceli - DIN 2076 firmy Hennlich Industrietechnik.



Obr. 3 Servomechanismus

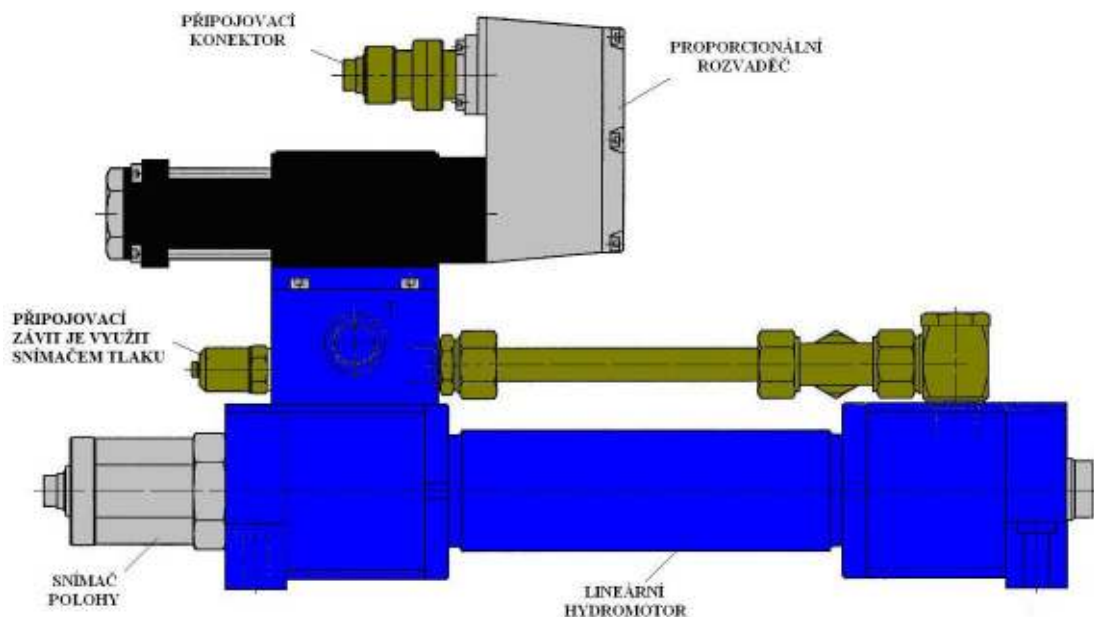
1 - lineární hydromotor, 2 - proporcionální rozváděč, 3 - snímač tlaku, 4 - vestavěný snímač polohy, 5 - podstavná deska, 6 - tlačná pružina, 7 - U - profil, 8 - zátěž

2.1 Popis jednotlivých komponentů hydraulického a regulačního systému

Servopohon je konstrukční celek, sestávající z hydromotoru, servoventilu nebo rychlého proporcionálního ventilu a snímače polohy pístnice. Může být lineární nebo rotační. V laboratoři katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení je instalován servopohon lineární (obr. 4). Řídicí prvek, rychlý proporcionální rozváděč, je umístěn přímo na hydromotoru.

Jedním z požadavků na vlastnosti servopohonu je požadavek minimálních pasivních odporů, navíc nezávislých na rychlosti pohybu, čímž je zabráněno vzniku trhavého pohybu

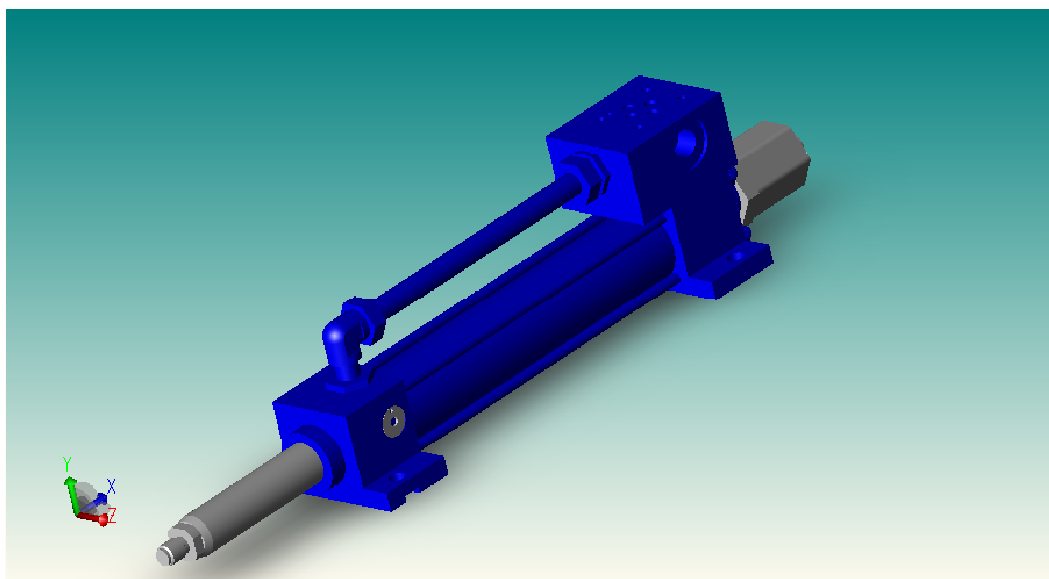
(tzv. drhnutí, *stick - slip*) v oblasti nízkých rychlostí. U přímočarých hydromotorů se problém drhnutí řeší použitím teflonových těsnění a teflonových vodících pouzder (obr. 6).



Obr. 4 Lineární servopohon

2.1.1 Lineární hydromotor

Lineární hydromotor (obr. 4) slouží k přesnému polohování. Pístnice je spojena se systémem odměřování polohy válce (obr. 8). V servopohonu je instalován diferenciální válec Ulbrich hydraulik, typ UHN 315 - 40/28 - 200 s maximálním zdvihem pístnice 200 mm.



Obr. 5 3D model lineárního hydromotoru, $\phi 40 / \phi 28$ mm, zdvih 200 mm

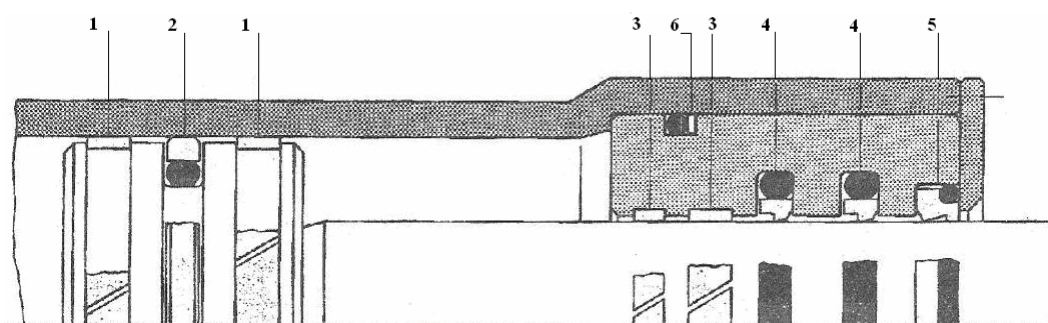
Parametry lineárního hydromotoru

Tab. 1 Parametry lineárního hydromotoru

Typové označení	<i>UHN 315 - 40/28 - 200</i>
Průměr pístu	<i>40 mm</i>
Průměr pístnice	<i>28 mm</i>
Zdvih	<i>200 mm</i>
Jmenovitý tlak	<i>31,5 MPa</i>
Maximální rychlost pístu	<i>1 m·s⁻¹</i>

Těsnění

Jelikož od hydromotoru vyžadujeme plynulý pohyb při nízkých rychlostech, je nutné použití těsnících prvků z polytetrafluoretylenu (PTFE). Samotné prvky jsou však málo pružné, proto jsou použité v kombinaci s elastickým prvkem, který mu pružnost dodává. Hydromotor vybavený uvedeným těsněním a vedením se vyznačuje velmi nízkými třecími odpory za klidu i za pohybu (obr. 6) a nevykazuje proto *stick - slip* efekt (drhnutí). Odolává téměř všem běžným látkám. Je chemicky stabilní.



Obr. 6 Kombinované těsnění servomechanismu

*1,3 - vodící kroužky PTFE, 2 - těsnění pístu, 4 - těsnění pístnice zvané „Stepseal“,
5 - stírací kroužek, 6 - O-kroužek podložený opěrným kroužkem z PTFE.*

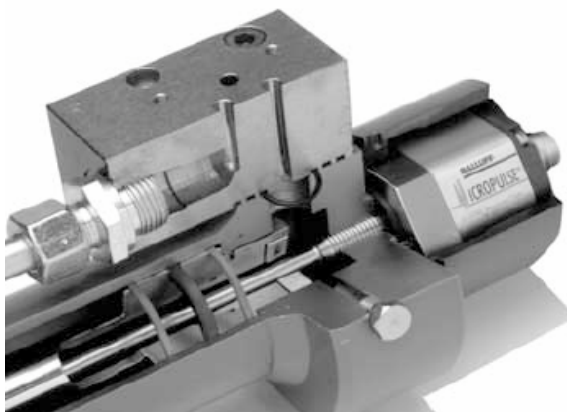
2.1.2 Snímač polohy

V rámci mé bakalářské práce, *Návrh polohového regulace lineárního servopohonu*, zpětnou vazbu zajišťoval vestavěný snímač polohy BTL5 - A11 - M0200 - BS32 firmy Balluff (obr. 7).

Jedná se o analogový snímač s napěťovým výstupem snímané polohy v rozsahu 0 až + 10 V a měřicím rozsahem 0 až 200 mm.



Obr. 7 Vestavný snímač polohy firmy Balluff



Obr. 8 Instalace polohového snímače v hydraulickém válci

Technické parametry snímače polohy

Tab. 2 Parametry snímače polohy Balluff BTL 5

Vstupní signál	<i>analogový</i>
Jmenovitá délka	<i>200 mm</i>
Výstupní napětí	<i>0 až 10 V a 10 až 0 V</i>
Hystereze	<i>$\leq 5 \mu m$</i>
Opakovatelnost	<i>rozlišení systému / min. $2 \mu m$</i>

2.1.3 Tlakový snímač

V regulačním obvodu je důležité přesné snímání skutečných hodnot výstupních veličin. Zpětnou vazbu zajišťuje tlakový snímač HM17 - 1X/315 - C/V0/0 firmy BoschRexroth. Aby nedocházelo k rozkreslení skutečných hodnot, je nutné připojit tlakový snímač přímo na regulační kanál v připojovací kostce (obr. 9).

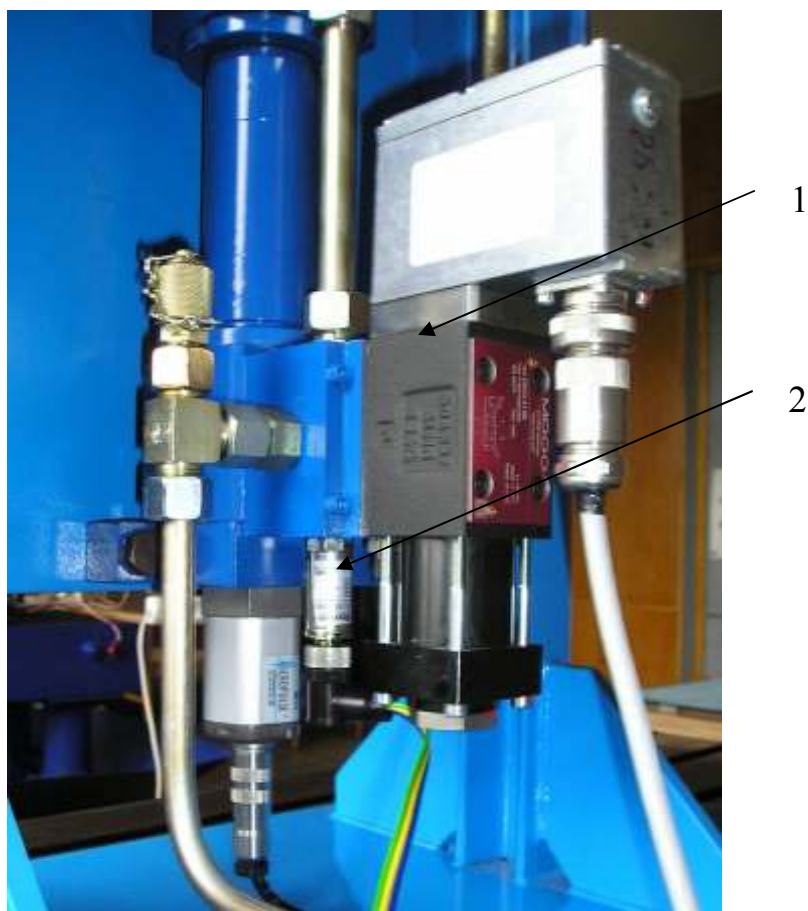
Tlakový snímač (obr. 9) je vybaven integrovanou elektronikou. K vlastnostem snímače patří zejména přeměna tlaku v elektrický analogový signál, který se přivádí na analogový vstup karty VT - HACD - 1 (obr. 20).

Jedná se o snímač s proudovým výstupem snímaného tlaku v rozsahu 4 až 20 mA a maximálním provozním tlakem 780 bar.

2.1.4 Proporcionální rozváděč

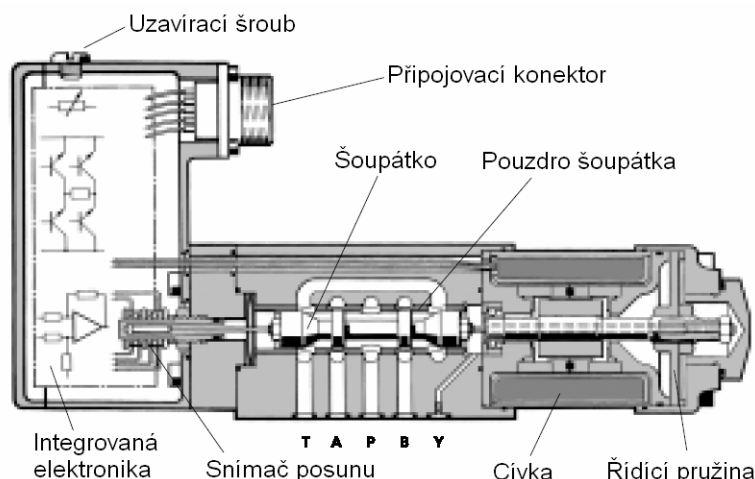
Proporcionální rozváděč slouží k řízení směru a velikosti průtoku. Rozdělují se na přímo řízené (jednostupňové, obr. 9) a nepřímě řízené (též dvojstupňové) rozváděče. Vyznačují se spojitým řízením tlaku a průtoku na výstupu, když vstupním elektrickým signálem je napětí malého výkonu. Tvar řídicího signálu lze snadno naprogramovat na připojené elektronické řídicí kartě, nebo zadávat externě z generátoru signálu.

Základním konstrukčním prvkem je čtyřhranové šoupátko s drážkami. Ty mohou být obdélníkové, obdélníkové odstupňované, půlkruhové nebo trojúhelníkové. Čím vyšší je signál z řídicí elektroniky, o to více se šoupátko posouvá. Zdvih šoupátka je tedy proporcionální elektrickému signálu.



Obr. 9 Připojený proporcionální regulační ventil

1 - přímo řízený proporcionální regulační ventil MOOG D633, 2 - tlakový snímač HM - 17



Obr. 10 Řez proporcionálním regulačním ventilem MOOG D633

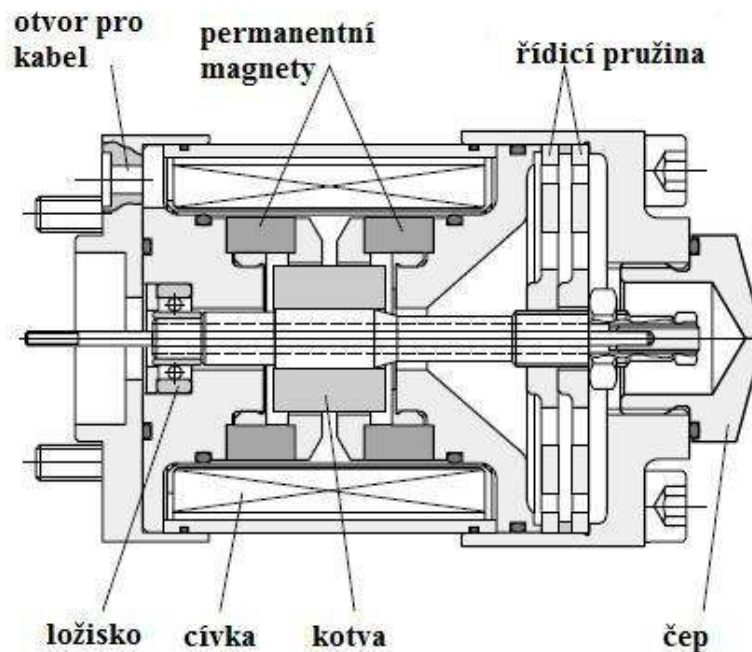
Elektromechanický převodník

Elektromechanický převodník je spojovací článek mezi řídicí elektronikou a mechanikou ventilu. Zatímco klasické řídicí prvky používají vesměs jediný typ elektromechanického převodníku - elektromagnet, proporcionální řídicí prvky používají celou řadu různých typů elektromechanických převodníků, založených na nejrozličnějších principech.

V přímo řízeném proporcionálním regulačním ventilu firmy MOOG D633 (obr. 10) umístěném v laboratoři katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení je instalován lineární silový motor (obr. 11), který zde plní funkci elektromechanického převodníku.

Lineární motor

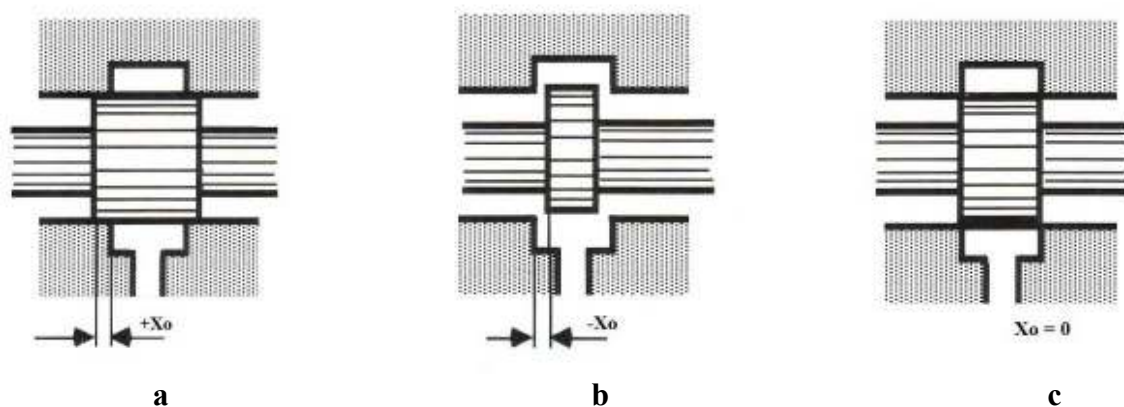
Lineární motor (obr. 11) je tvořen permanentními magnety uspořádanými tak, že kotva se nachází v základní poloze uprostřed zdvihu. Protéká - li cívkou elektrický proud, vychyluje se kotva podle polarity proudu v jednom nebo druhém směru. Zdvih kotvy bývá cca 0,7...2 mm, vyvozená maximální síla do ± 300 N. (U proporcionálních elektromagnetů činí zdvih 3...5 mm, maximální síla do 180 N v jednom směru). Díky kratšímu zdvihu a větší síle je lineární motor rychlejší než proporcionální elektromagnet. Vlastní frekvence převodníků při 25% vstupním signálu dosahuje 260 Hz.



Obr. 11 Lineární silový motor

Typy překrytí hran šoupátek ventilů

Šoupátko ventilu musí být vyrobeno s mimořádnou přesností. Vůle mezi šoupátkem a otvorem bývá $4 \dots 8 \mu m$. Ostré hrany šoupátek jsou zaobleny poloměrem $r = 1 \dots 3 \mu m$. Šířka kroužku šoupátka může být: větší než je šířka obvodové drážky (komory), stejná jako šířka drážky nebo menší než je šířka drážky (obr.12). Podle toho hovoříme o šoupátku s pozitivním překrytím hran (bývá $+0,5 \dots +1,5 \%$ zdvihu) je vhodné pro obvody s regulací rychlosti. Šoupátko s negativním překrytím hran (bývá $-0,5 \dots -1,5 \%$ zdvihu) je vhodné pro obvody s regulací polohy a síly. Šoupátko s nulovým překrytím hran (bývá $0 \dots +0,5 \%$ zdvihu) je vhodné pro univerzální použití.



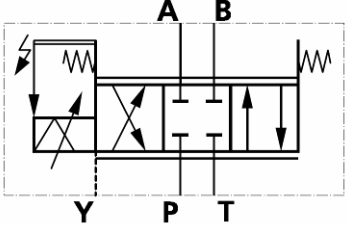
Obr. 12 Překrytí hran šoupátka
a - pozitivní, b - negativní, c - nulové

Pozitivní překrytí hran šoupátka (obr. 12 a) uzavírá v mezipolohách průchody vedení přes ventil a zajišťuje bezpečné uzavření. Díky tomu může například ve výchozí poloze ventilu stoupnout ve vedení tlak, který je potřebný pro přestavení jiných jednotek. Negativní překrytí hran (obr. 12 b) umožňuje měkké přepínání mezi různými rychlostmi pohybu. Nulové překrytí hran (obr. 12 c) zaručuje přechody mezi propojením různých hydraulických vedení bez časových prodlev. Průběh sklonu průtokové charakteristiky je plynulý (obr. 14).

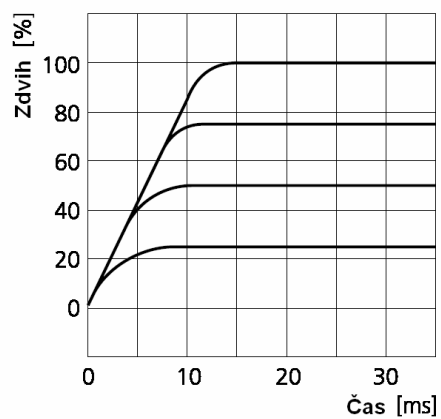
Průtok prosakujícího oleje při nulovém elektrickém signálu udává kvalitu těsnění šoupátka ve ventilu. Negativní překrytí hran šoupátka má dobrý těsnicí účinek, kdežto u pozitivního překrytí hran je tento účinek malý.

Technické parametry proporcionálního regulačního ventilu

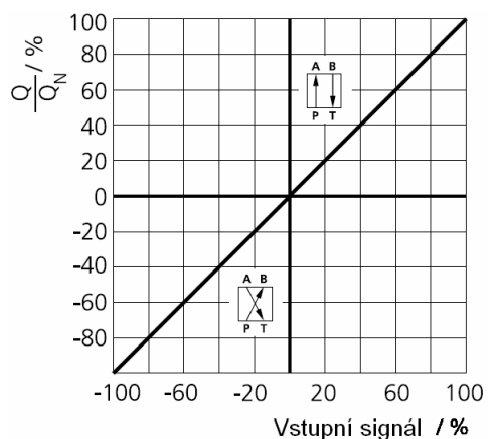
Tab. 3 Parametry proporcionálního regulačního ventilu

Výrobce	MOOG
Typová řada	D633
Typové označení	D633 313B R16K01M0NSM2
Typ rozváděče	<i>3 - polohový, 4 - cestný</i>
Překrytí hran šoupátka	<i>nulové</i>
Schématická značka	
Napájecí napětí	<i>24 VDC (19 - 32 VDC)</i>
Vstupní napětí	<i>±10 VDC</i>
Vstupní proud	<i>4 až 20mA</i>
Jmenovitý průtok	<i>40 l/min</i>
Maximální průtok	<i>75 l/min</i>
Maximální provozní tlak	<i>35 MPa</i>
Tlaková ztráta na hranách šoupátka	<i>3,5 MPa</i>
Požadavky na kapalinu	
Přípustná viskozita	<i>5 mm² · s⁻¹ až 400 mm² · s⁻¹</i>
Doporučená čistota kapaliny	<i>14/11 dle ISO 4406</i>
Přestavný čas 0 - 100% zdvihu	<i>≤ 12 ms</i>
Hystereze *	<i>≤ 0,2 %</i>
* při provozním tlaku $p_p = 14 \text{ MPa}$, viskozitě $\nu = 32 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a teplotě $t = 40^\circ\text{C}$	

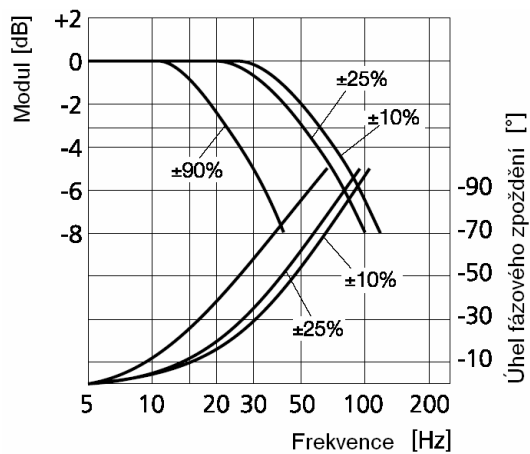
Charakteristiky proporcionálního regulačního ventilu



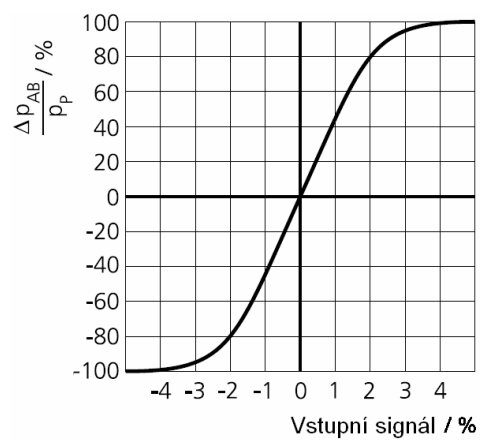
Obr. 13 Přechodová charakteristika



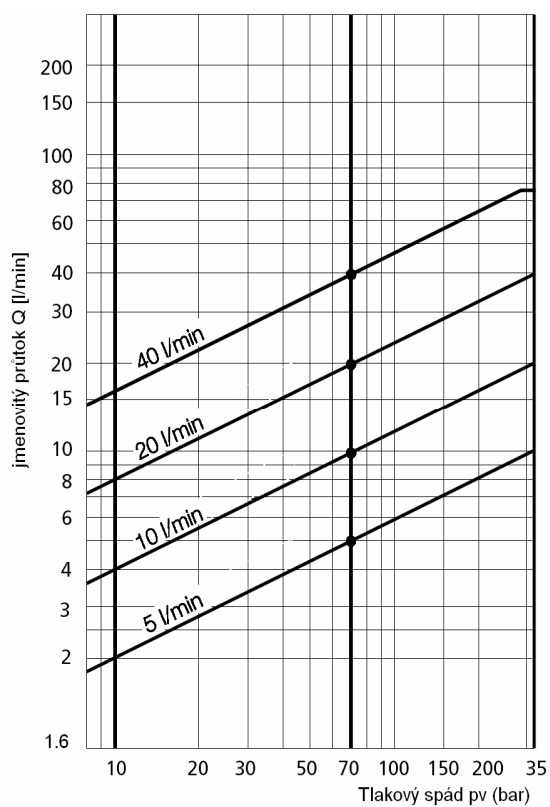
Obr. 14 Poměrná průtoková charakteristika



Obr. 15 Logaritmická modulová a fázová frekvenční charakteristika

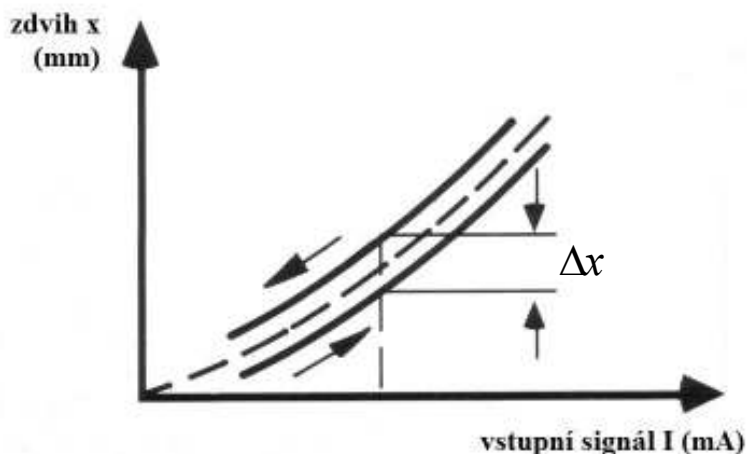


Obr. 17 Tlaková charakteristika



Obr. 16 Závislost průtoku na tlakovém spádu

Proporcionální regulační ventil má chybu hystereze (obr. 18), ta je způsobena elektromagnetickými vlastnostmi materiálu kotvy. Hystereze je závislost určitého stavu na stavech předcházejících. Při změně elektrického signálu z 0 na maximum a zpět zaujímá šoupátko proporcionálně k signálu určitou polohu. Odchylka vzniklá při stejné žádané hodnotě, ale v obráceném směru se nazývá hystereze.



Obr. 18 Závislost zdvihu šoupátka k vstupnímu signálu

Δx - chyba hystereze

2.1.5 Zdroj tlaku

Hydraulický agregát (obr. 19) firmy Interfluid slouží jako zdroj tlakové energie. V příloze je doložené schéma hydraulického agregátu (příloha A 1).



Obr. 19 Hydraulický agregát

1 - akumulátor, 2 - pojistný ventil, 3 - odlehčovací ventil, 4 - termostat, 5 - elektromotor, 6 - odpadní filtr, 7 - nádrž

Hydraulický agregát (obr. 19) se skládá z hranaté nádrže o objemu $0,06 \text{ m}^3$, elektromotoru, neregulačního hydrogenerátoru, který je ponořený v nádrži, nízkotlakého filtru, pojistného ventilu, odlehčovacího ventilu a termostatu. Pro odečítání tlaku je nezbytným příslušenstvím také manometr. Dále jako zásobník energie a zdroj konstantního tlaku, k tlumení pulsací, k vyhlazení tlakových špiček a k vyrovnávání objemů slouží hydropneumatický membránový akumulátor. V tabulce jsou uvedeny hlavní parametry jednotlivých prvků.

Technické parametry hydraulického agregátu

Tab. 4 Parametry hydraulického agregátu

<i>Elektromotor</i>	
Výkon	4 kW
Otáčky	$1430 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$
<i>Hydrogenerátor</i>	
Geometrický objem	$V_g = 9,5 \text{ cm}^3$
Jmenovitý průtok	$Q_N = 14,2 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
<i>Hydropneumatický Akumulátor</i>	
Minimální pracovní tlak	$p_1 = 6 \text{ MPa}$
Maximální pracovní tlak	$p_2 = 13 \text{ MPa}$
Efektivní objem plynu akumulátoru	$V_0 = 2 \text{ dm}^3$
<i>Nádrž</i>	
Objem nádrže	$V_N = 60 \text{ dm}^3$

2.1.6 Řídicí elektronika pro proporcionální ventily

Ke každému proporcionálnímu prvku je koncipován zesilovač obsahující specifickou elektroniku. Přímě řízený proporcionální regulační ventil (obr. 9) je řízen digitální kartou s jedním regulačním obvodem typ VT - HACD - 1, BoschRexroth (obr. 20).



Obr. 20 Karta VT - HACD - 1, BoschRexroth

Charakteristické znaky karty VT - HACD

HACD: *Hydraulic Axis Controller Digital.*

Hlavním úkolem karty VT - HACD je regulování polohy, rychlosti, tlaku nebo síly. VT - HACD je realizovaná jako oboustranně osazený tištěný spoj v evropském formátu 100 x 160 mm. Mikropočítač řídí celý průběh, provádí přizpůsobení a realizuje regulační obvody.

Funkce karty VT - HACD

Kartu lze nastavovat ve třech různých módech:

Mode 1 - blokové volání (tovární nastavení)

Lze vyvolat až 32 vnitřních bloků binární kombinací digitálních vstupů *DI1* až *DI5* s povolením *DI6*.

Mode 2 - pohybový profil

Jednoduchý mód pro polohovou regulaci.

Mode 3 - sekvenční řízení

Nejrozsáhlejší mód, obsahuje všechny funkce módů 1 a 2, navíc umožňuje sekvenční řízení.

Potřebné příslušenství

PC program BODAC, který lze stáhnout z internetu, www.boschrexroth.com/hacd .
Kabel pro rozhraní: sada kabelů VT - HACD - 1X/03.0/HACD - PC (lze použít běžný sériový kabel RS 232 1:1).

Konfigurace karty VT - HACD

Data specifická pro kartu (konfigurace a parametry) jsou pevně uložena v paměti. Kompletní konfigurace se provádí pomocí softwaru BODAC (programové vybavení). Karta neobsahuje žádné propojovací můstky nebo podobné zařízení. Pro konfiguraci se karta VT - HACD propojí s PC pomocí sériového rozhraní (RS 232).

Karta VT - HACD jako regulátor

Pokud je karta VT - HACD používána jako karta regulátoru, je nutno navolit do vazby signálů zápis „*Controller*“. Struktura regulátoru je stejná jako u regulátoru PIDT1, kde se aktivuje / deaktivuje každá položka samostatně. Tak lze pomocí této karty realizovat regulátor typu P nebo PT1. Integrační složku lze řídit dodatečně pomocí okna (horní a spodní mez).

Rozpoznání chyb a jejich ošetření

Karta HACD podporuje značné možnosti kontroly výskytu chyb:

- kontrola snímače SSI na přerušený kabel (v mém případě nevyužívám)
- sledování regulační odchylky
- kontrola napájecího napětí, všech interních napětí jakož i referenčního napětí ± 10 V
- samokontrola mikropočítače a paměti
- kontrola vstupních a výstupních veličin karty, popř. nezapojení zpětné vazby

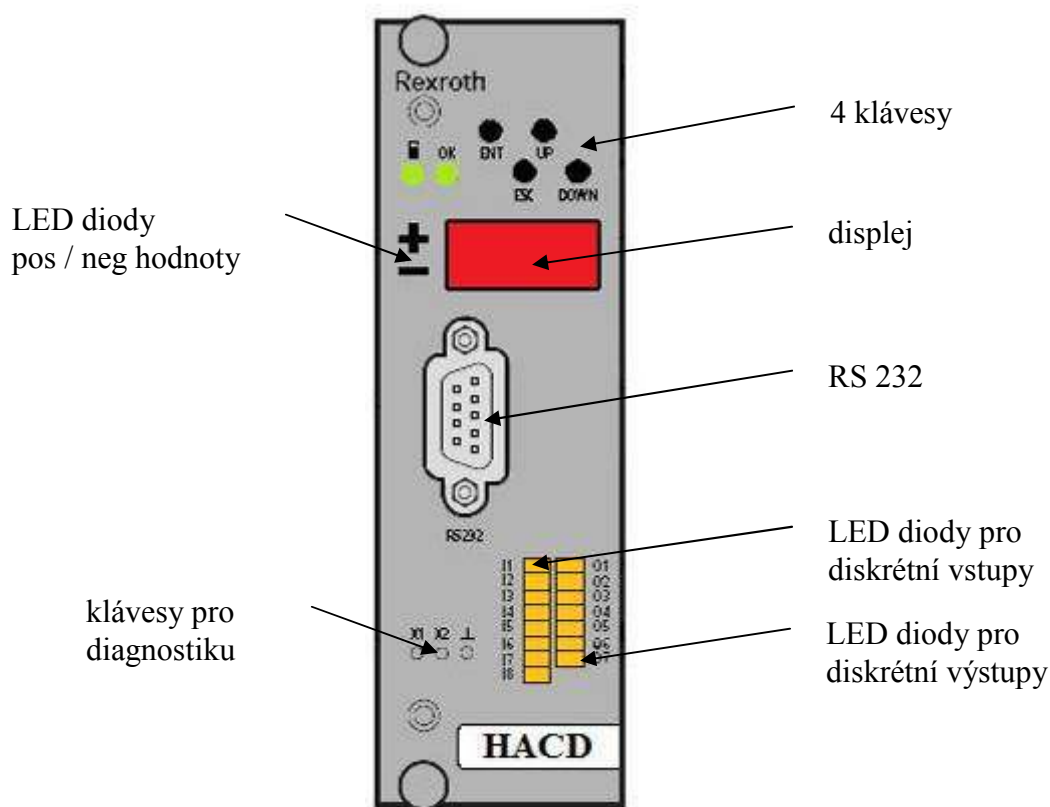
Čelní panel VT - HACD - obsluha

Displej na čelním panelu slouží ve spojení se 4 tlačítky pro zobrazení a změnu parametrů, také i pro diagnostické účely (obr. 21). Příslušnou strukturou nabídek (*menu*) je realizován přístup na parametry karty HACD. Hodnoty parametrů lze jak zobrazit tak měnit. Přístup je na následující parametry:

- žádaná hodnota a parametry náběhové rampy
- skutečná hodnota
- parametry regulátoru
- přizpůsobení výstupů
- analogové vstupy / výstupy
- parametry snímače SSI
- navolení jazyka

Jako diagnostické možnosti jsou k dispozici zobrazení žádaných a skutečných hodnot, dále i vydání hlášení chyb.

Popis čelního panelu karty:



Obr. 21 Čelní panel karty VT - HACD - 1

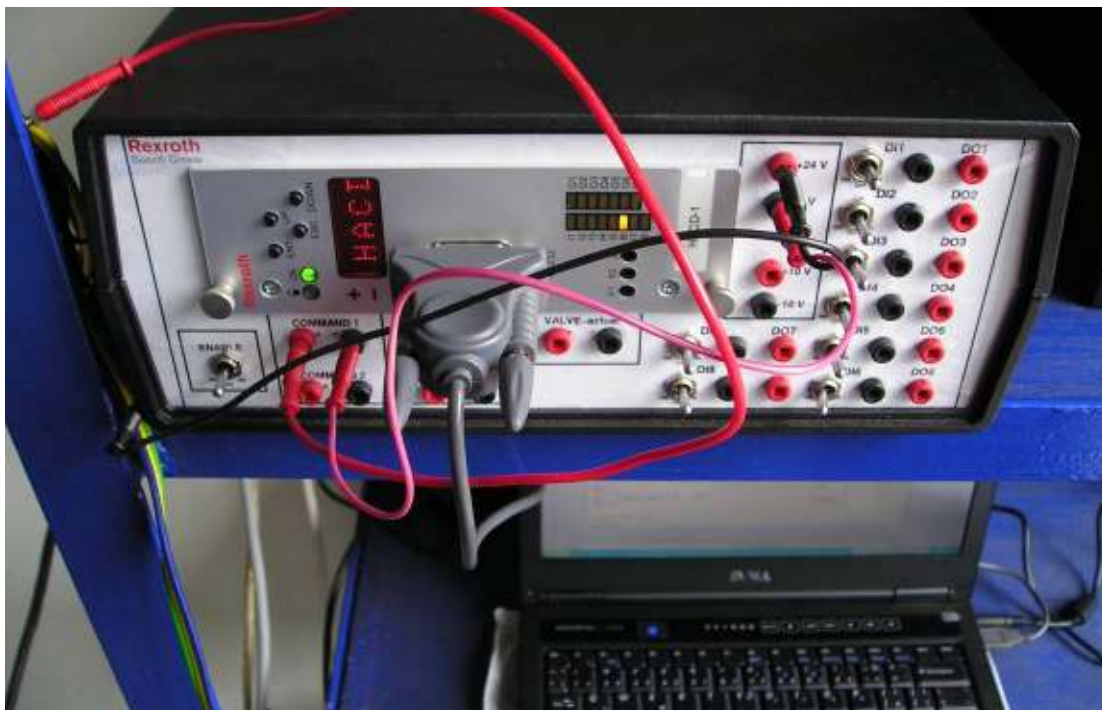
Technické parametry digitální karty VT - HACD

Tab. 5 Technické parametry karty VT - HACD

provozní napětí	U_B	24 VDC + 40% - 10%
funkční rozsah:		
- horní mezní hodnota	$u_B(t)_{\max}$	35 V
- spodní mezní hodnota	$u_B(t)_{\min}$	21 V
spotřeba proudu	I_{\max}	150 mA
pojistka	I_S	4 AT
digitální vstupy	U	log 0 = 0 až 5 V log 1 = 15 V až U_B
digitální výstupy	U	log 0 = 0 až 5 V log 1 = 15 V až U_B $I_{\max} = 30 \text{ mA}$
analogové vstupy konfigurace jako napěťové vstupy rozsah vstupní odpor rozlišení nelinearita	U R_e	0 až 10 V nebo $\pm 10 \text{ V}$ (lze konfigurovat) 100 k Ω > 10 M Ω pro vstup AI 3 5 mV pro rozsah ± 10 2,5 mV pro rozsah 0...10 < 10 mV
analogové výstupy A0 1 konfigurace jako napěťové výstupní napětí výstupní proud zátěž rozlišení	U I_{\max} R_{\min}	0...10 V nebo $\pm 10 \text{ V}$ (lze konfigurovat) 20 mA 500 Ω 1,25 mV (14 bitů)
A0 2 výstupní napětí výstupní proud zátěž rozlišení	U I_{\max} R_{\min}	V 10 mA 1 k Ω 10 mV (11 bitů)
doba vzorkování	T	2 ms
časová konstanta náběhové rampy	t_{\max}	300 s
sériové rozhraní		RS 485 (na čelním panelu), zdířka D - Sub
druh připojení		64 - pólový konektor, DIN 41 612
rozměr karty		evropský formát 100 x 160 mm, DIN 41 494
přípustná oblast provozních teplot	v	0 až 50 °C
skladová teplota	v	- 20 až + 70 °C
hmotnost	m	0,2 kg

2.1.7 Ovládací pult karty VT - HACD

Ovládací pult, Bosch Rexroth (obr. 22), slouží jako propojovací rozhraní použitého digitálního regulátoru VT - HACD.



Obr. 22 Čelní maska ovládacího pultu s instalovaným regulátorem VT - HACD - 1

Popis vstupů a výstupů na ovládacím pultu

ENABLE

- přepínač aktivace karty, není - li aktivováno na výstupech karty jsou log. „0“ a 0 V nebo 0 mA

COMMAND 1

- žádost č. 1; připojeno na analogový vstup AI1 karty VT - HACD (piny b10, b12) nastaveno na 4 až 20 mA (využívám z důvodu připojení zpětné vazby)

COMMAND 2

- žádost č. 2; připojeno na analogový vstup AI2 karty VT - HACD (piny b6, b8)
- nastaveno na 0 až 10 V (v mém případě nevyužívám)

ACTUAL 1

- analogový výstup AO1 karty VT - HACD (piny d30, b28) - žádost pro ventil, nastaveno na ± 10 V

ACTUAL 2

- analogový výstup AO2 karty VT - HACD (piny d32, b28) - aktuální poloha válce, nastaveno na 0 až 10 V

VALVE - actual

- aktuální poloha ventilu - záleží na typu zpětné vazby použitého ventilu (nevyužívám z důvodu proudového signálu 4 až 20 mA zpětné vazby ventilu MOOG)

+24 V

- zdroj + 24 V DC (max. 20 až 28 V/200 mA)

0 V

- 0 V napájecího zdroje

+10 V

- zdroj + 10 V DC (max. 30 mA)

- 10 V

- zdroj - 10 V DC (max. 30 mA)

DI1 - DI8

- digitální vstupy karty VT - HACD (lze aktivovat pomocí přepínače nebo externě připojením do příslušné zdířky)

DO1 - DO7

- digitální výstup karty VT – HACD

OK

- digitální výstup karty VT - HACD (aktuální stav karty; karta v pořádku = log. „1“)

V příloze je doložené schéma zapojení ovládacího pultu (příloha A 2).

Technické parametry ovládacího pultu

Tab. 6 Technické parametry ovládacího pultu

napájecí napětí	+ 24 V DC (max. 21 až 32 V) stabilizovaný zdroj + 24 V DC (max. 20 až 28 V)
proudový odběr	$I_{\max} = 2,7 \text{ A}$ (závisí na použitém hydraulickém rozváděči) $I_{\max} = 150 \text{ mA}$ pro stabilizovaný zdroj
rozhraní	1x napájecí kabel, 1x kabel snímače odměřování válce, 1x kabel rozváděče
digitální regulátor	VT - HACD - 1 - 1X / VO/1 - 0 - 0, MNR: R900745354
držák karty	VT - 3002 - 2X/64G, MNB: R900991843
rozměry	235 x 217 x 92 mm (d x h x v)
operační teplota	0 až 50°C
skladovací teplota	- 20 až + 70 °C

2.2 Šroubovité tlačné pružiny

Tlačné pružiny válcového tvaru jsou tvořené šroubovitě vinutými dráty se stálou vůlí mezi činnými závity (obr. 23), způsobilé přijímat vnější síly působící v jejich ose proti sobě. Pružiny s průměrem drátu do cca. 16 mm se obvykle navíjejí za studena. Formování za tepla se používá pro výrobu vysoce namáhaných pružin větších rozměrů s průměrem drátu přes 10 mm. Obvykle jsou tlačné pružiny vyráběny z drátů a tyčí kruhového průřezu.



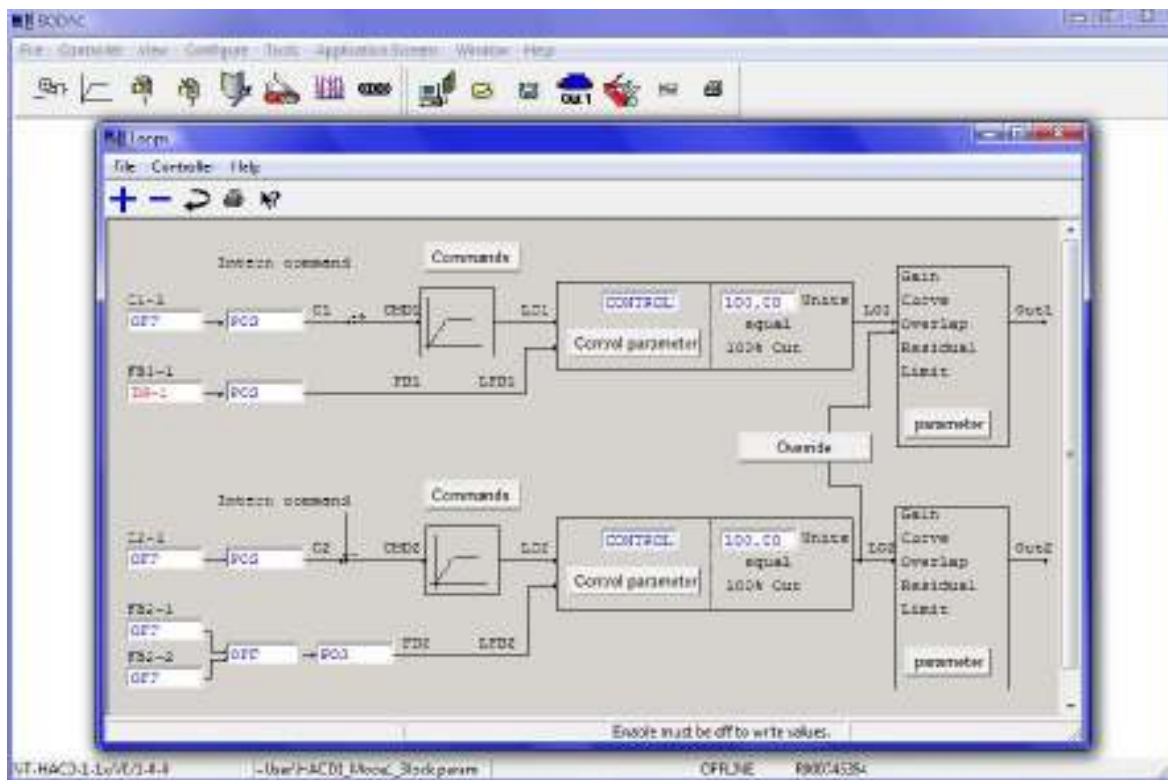
Obr. 23 Pohled na servomechanismus včetně zatěžující síly

*1 - vnitřní tlačná pružina v zatíženém stavu, 2 - vnější tlačná pružina v zatíženém stavu,
3 - zátěž ve formě ocelových kotoučů 30 kg*

3 NASTAVENÍ DIGITÁLNÍ ŘÍDICÍ KARTY VT - HACD

Veškeré parametry digitální řídicí karty se nastavují buď interně pomocí ovládacího programu BODAC nebo externě přes generátor signálu. Řídicí kartu VT - HACD (obr. 20) nastavuji interně přes *software* BODAC.

3.1 Software BODAC



Obr. 24 Hlavní nastavovací okno programu BODAC označené jako *Loops*

CI - 1 - externí žádost, CI - upravená vnější žádost, CMD1 - součet vnějších a vnitřních žádostí, LC1 - aktuální žádost tlaku včetně aktuální rychlosti, FB1 - upravený signál zpětné vazby, LO1 - výstup z regulátoru, Out 1 - výstupní signál přímo na proporcionální ventil

Na obr. 24, v hlavním nastavovacím okně programu BODAC, jsou znázorněny dvě regulační smyčky (*Loops*), které zobrazují celý postup regulace. Soustředíme se jen na první smyčku (*Loop 1*). Protože regulace tlaku není řízená externě přes připojený generátor signálu, ale pouze vnitřně přes program BODAC je vstup pro externí žádost vypnutý (*OFF*). Na analogovém vstupu IN - 1, je přiveden signál pro zpětnou vazbu, kterou zajišťuje tlakový snímač HM17 - 1X / 315 - C / V 0 / 0 (obr. 9).

K tlakové regulaci je nutné správně zapojit snímač tlaku v obvodu (obr. 9). Dále jej nakonfigurovat v programu BODAC. K tomu, vyvolám okno *Analog I / O - Inputs* (obr. 25), protože je snímač tlaku připojen na analogový vstup IN - 1 (obr. 24), využívám vstup

AI 1 (b10/b12), kde je nutné správně zvolit typ výstupního signálu, rozsah, upřesnit minimální a maximální rozsah signálu a také maximální jednotku.

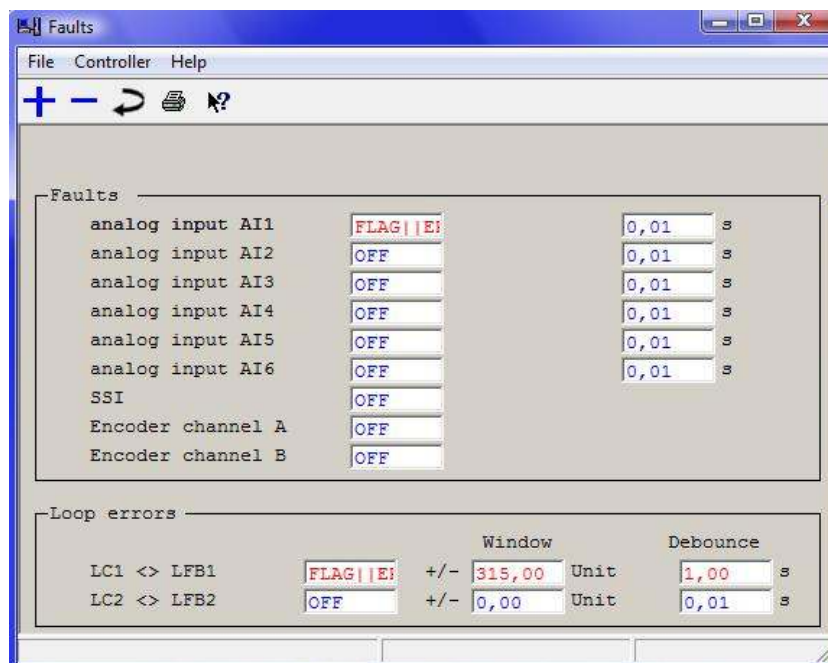


Obr. 25 Nastavení analogových vstupů a výstupů

V okně *Analog I / O - Outputs* (obr. 25) také nastavuji rozsah a typ výstupního signálu na proporcionální regulační ventil AO 1(d30/b28).

Jedním z charakteristických znaků karty VT - HACD je rozpoznání chyb a jejich ošetření. K tomu, aby karta sledovala chyby v regulační smyčce je nutné nastavit režim poruch v okně *Faults* (obr. 26). Jedná se o kontrolu vstupních a výstupních veličin popř. nezapojení zpětné vazby - tlakového snímače. Protože je snímač připojen na analogový vstup AI 1 (obr. 25), je nutné ho také nastavit v okně *Faults* u příslušného vstupu, kde aktivuji „indikace/ /porucha“ (*FLAG/ /ERROR I*).

Úkolem regulace je vyloučení vlivu poruchové veličiny na regulovanou veličinu. Tuto vlastnost je zapotřebí také nastavit v okně *Faults* (obr. 26). Karta VT - HACD musí rozpoznat vzniklý rozdíl mezi žádanou *LCI* a skutečnou hodnotou *LFBI*, z toho důvodu aktivuji poruchy smyčky (*Loop Errors*).



Obr. 26 Nastavení aktivace poruch

Pro nastavení tlaku i rychlosti válce vyvolám okno *Commands* (obr. 27).

Commands									
File Controller Help									
<div> <div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div> <div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div> <div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div> <div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div> <div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div> <div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div> </div>									
	Loop 1 Command	Loop 1 Velocity+	Loop 1 Velocity-	Loop 1 S-ramp start	Loop 1 S-ramp end	Loop 2 Command	Loop 2 Velocity+	Loop 2 Velocity-	
	[Units]	[Units/s]	[Units/s]	[s]	[s]	[Units]	[Units/s]	[Units/s]	
binary 0	0,00	100,0	100,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 1	5,00	100,0	100,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 2	30,00	100,0	100,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 3	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 4	50,00	100,0	100,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 5	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 6	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 7	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 8	60,00	100,0	100,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 9	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 10	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 11	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 12	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 13	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 14	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 15	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
binary 16	80,00	100,0	100,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	
-50000,00 -- 50000,00									

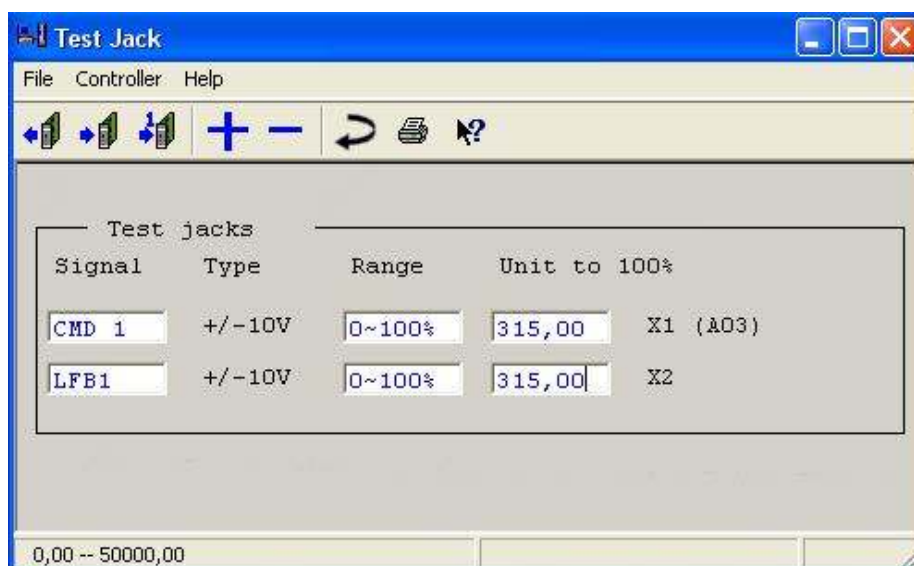
Obr. 27 Nastavení žádaných hodnot

V okně *Commands* je patrné, že první sloupec označený jako *Loop 1 Command* (žádosti smyčky 1) slouží k zapisování žádostí tlaku. *Units* (jednotky) budou tedy v barech.

Druhý a třetí sloupec je označen jako *Loop 1 Velocity +* a *Loop 1 Velocity -* (rychlost vysouvání a rychlost zasouvání válce). Pro rychlost platí, že *Units/s* (jednotky/s) udávají dráhu za čas, tedy $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Na digitální kartě VT - HACD jsou nastavené žádosti pro regulaci tlaku. Digitální vstupy *DI1 = binary 1*, *DI2 = binary 2*, *DI3 = binary 4*, *DI4 = binary 8* a *DI5 = binary 16*. Rychlost vysouvání (+) a zasouvání (-) pístnice v hydromotoru byla $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 27), z důvodu docílení téměř ideálního jednotkového skoku (omezeno na max. $5000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ programem BODAC).

Pro diagnostické účely slouží zdířky *X1* a *X2* na předním panelu karty VT - HACD (obr. 21). K nastavení měřících zdířek vyvolám okno *Test Jack* (obr. 28), kde nastavím signál požadované hodnoty *CMD 1* a signál skutečné hodnoty *LFB1*.



Obr. 28 Nastavení měřících zdířek karty

4 MĚŘENÍ DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ LINEÁRNÍHO SERVOPOHONU

Pokud máme přivedeno napájení do karty VT - HACD, na displeji (obr. 22) se zobrazuje text VT - HACD - 1 - 1x / V0 / 1 - 0 - 0, dále zapnutý zdroj napětí, spustíme PC *software* BODAC (obr. 24), který je nainstalován v počítači. BODAC se automaticky připojí na kartu. Jestli program komunikuje s kartou zjistíme tak, že ve spodní liště úvodního okna (obr. 24) je napsáno *online* (připojeno).

Pokud je program připojen ke kartě a máme zapnutý zdroj tlaku, můžeme vyzkoušet zda - li válec reaguje na regulaci tlaku pomocí třípolohových páček vyvedených z ovládacího pultu karty VT - HACD, označených jako *DI1* až *DI5* (obr. 22). Na ovládacím pultu digitální karty musí být zapnutý *enable* (přepínač aktivace karty). Protože je karta ovládána vnitřně přes program BODAC je nutné aktivovat binární přepínač *DI 6*.

Popis vlastního měření

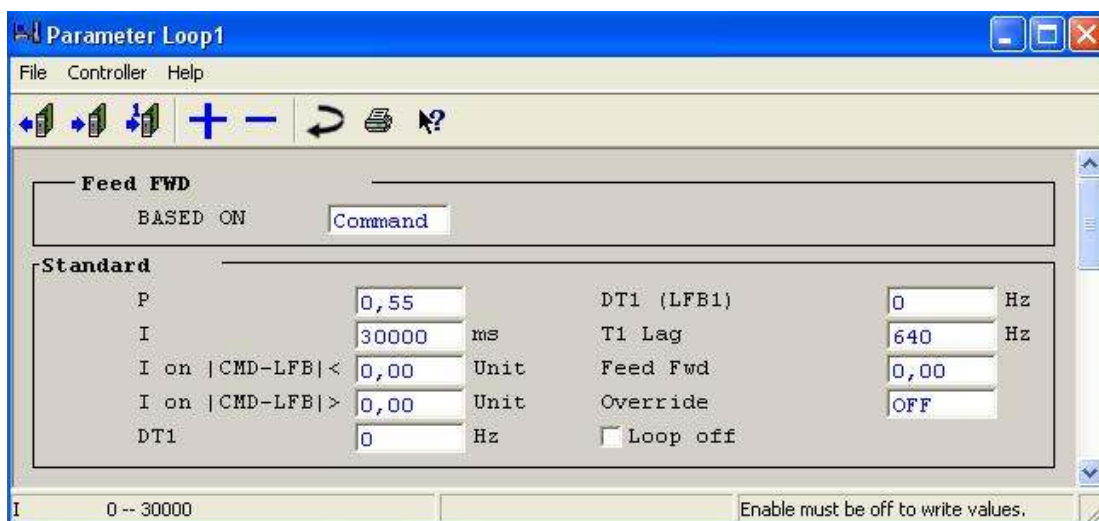
V první části měření jsem na digitální kartě VT - HACD (obr. 20) měnil zesílení regulátoru *P* (proporcionální složka analogového regulátoru) a sledoval změny chování systému. V druhé části měření jsem nastavoval zesílení u integračního analogového regulátoru *I* a rovněž sledoval změny chování systému. Výsledkem měření jsou odezvy skoků válce, zaznamenané pomocí programu BODAC. Měřil jsem jednotkový skok na digitální vstup *DI5* (žádost z 0 bar na 80 bar) u regulátoru *P* a naopak. U regulátoru *I* skok na digitální vstup *DI3*, (žádost z 0 bar na 50 bar) a naopak. Sledoval jsem dynamické chování systému při pohybu válce proti síle, kterou tvořily dvě tlačné pružiny o různých tuhostech (obr. 23). Pro každou hodnotu zesílení regulátorů jsem udělal záznam.

4.1 Měření při změnách zesílení regulátoru *P*

Proporcionální složka regulátoru *P* odpovídá na skokovou změnu vstupní veličiny skokovou změnou výstupní veličiny (akční veličiny).

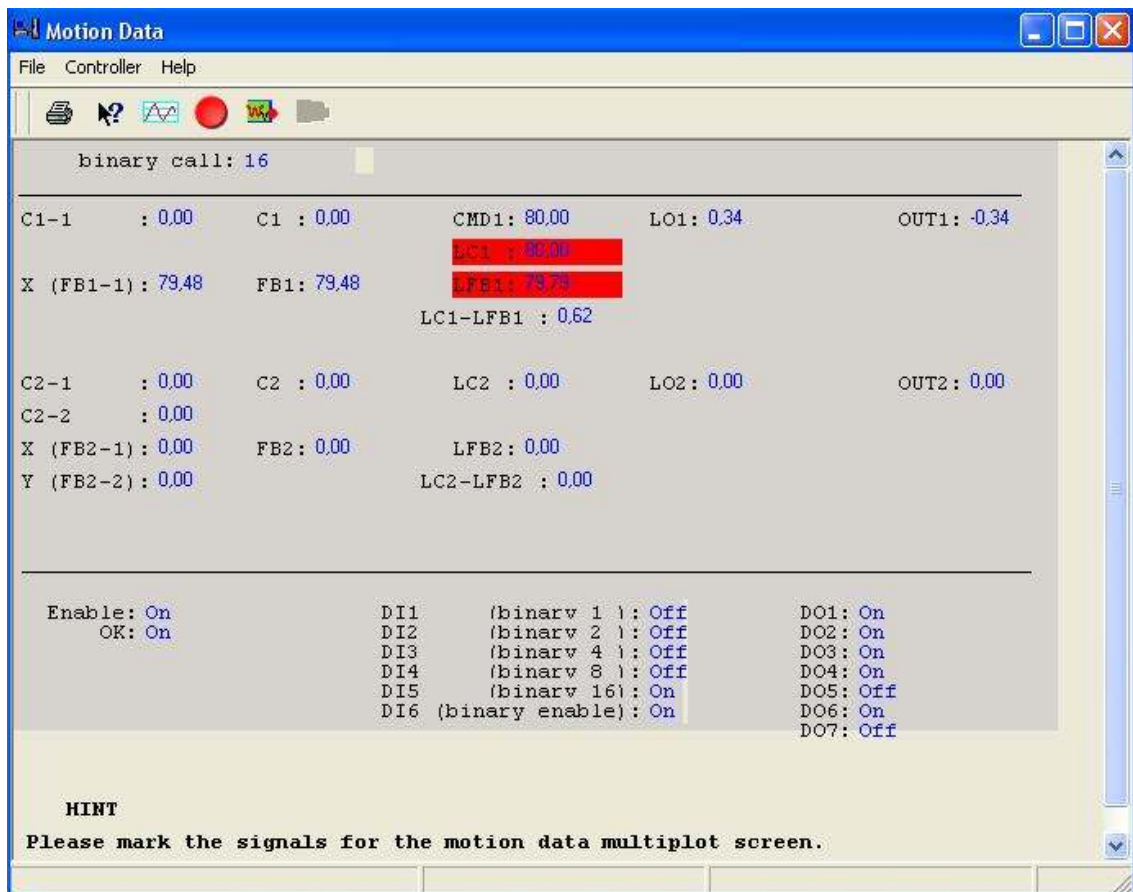
Při měření bylo vidět, že válec nedojížděl přesně na žádanou hodnotu, toto je způsobeno jednou z vlastností chování regulátoru *P*. Vždy musí být akceptována trvalá regulační odchylka (*LCI* - *LFBI*) závislá na činiteli zesílení. V okně „*Motion Data*“ (obr. 30) se tato vlastnost objevuje také.

Proporcionální regulátor P se postupně nastavoval v bloku pro nastavení parametrů regulátorů smyčky 1 na jednotlivá zesílení (obr. 29).



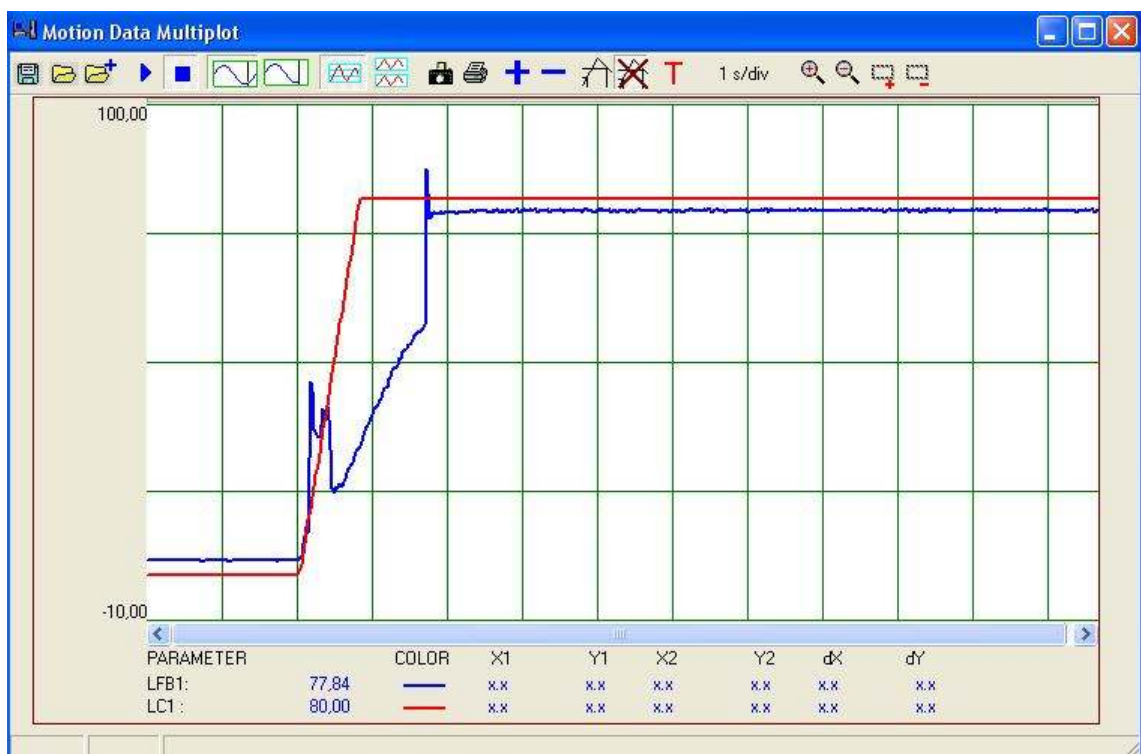
Obr. 29 Nastavení parametrů regulátoru smyčky 1

Na obr. 30 „*Motion Data*“ jsou zachyceny hodnoty regulační smyčky 1 při vyvolaném digitálním vstupu $DI5$ binárním přepínačem (*binary call: 16*), kde skutečný tlak je $LFB1$ 79,79 bar. Přitom žádaný tlak $LC1$ vyvolaný digitálním vstupem $DI5$ je 80 bar. V porovnávacím členu vzniká regulační odchylka, její velikost je tedy 0,62 bar. Tento signál regulační odchylky vstupuje do regulátorů. Jelikož mám aktivní pouze proporcionální složku P , je na ostatních výstupech z regulátorů nulový signál. Výstupní signál LOI z regulátoru P je 0,34 % - žádost na ventil 0,034 V. Tato žádost na otevření ventilu je tak malá, že se výrazně projevuje krytí šoupátka a jeho opotřebení. Výstupní signál na proporcionální regulační ventil $OUT1$ je - 0,34 % v konečné hodnotě tlaku. Za pohybu se tento signál různě měnil.



Obr. 30 Motion Data (Data regulační smyčky)

Označené signály se zobrazují v okně „Motion Data Multiplot“ (obr. 31).



Obr. 31 Motion Data Multiplot (Zobrazení signálů označených dat regulační smyčky)

Na obr. 31 je odezva na skok z tlaku 0 bar na hodnotu 80 bar, při zesílení regulátoru $P = 0,55$. Signály, které zobrazují tuto charakteristiku jsou *LC1* a *LFB1*. Modře je označen skutečný tlak, červeně žádaný tlak.

Při měření jsem využíval pouze měřicí prostředí programu BODAC. Tím nelze definovat přesnost měření, snahou bylo demonstrovat dynamické chování systému.

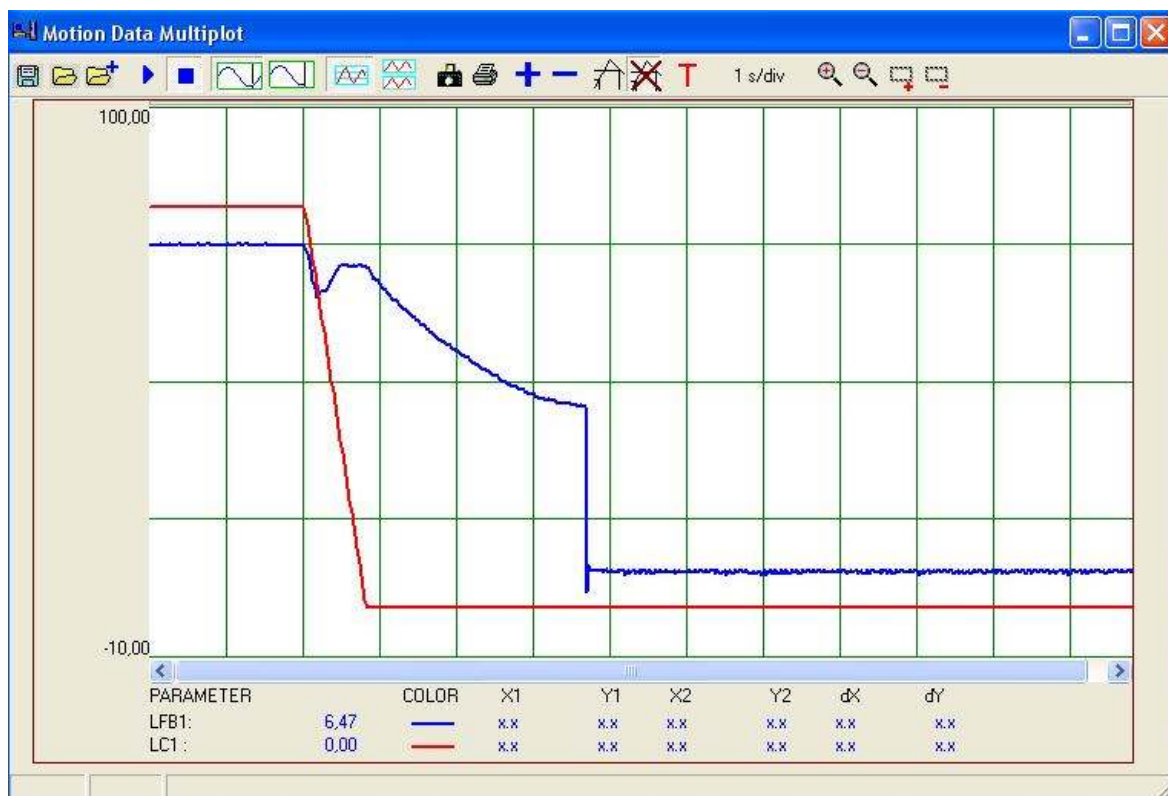
4.1.1 Výsledky měření při změnách zesílení regulátoru P

Výsledkem sledování dynamického chování systému, jsou odezvy pohybů válce při změnách zesílení proporcionální složky regulátoru P .

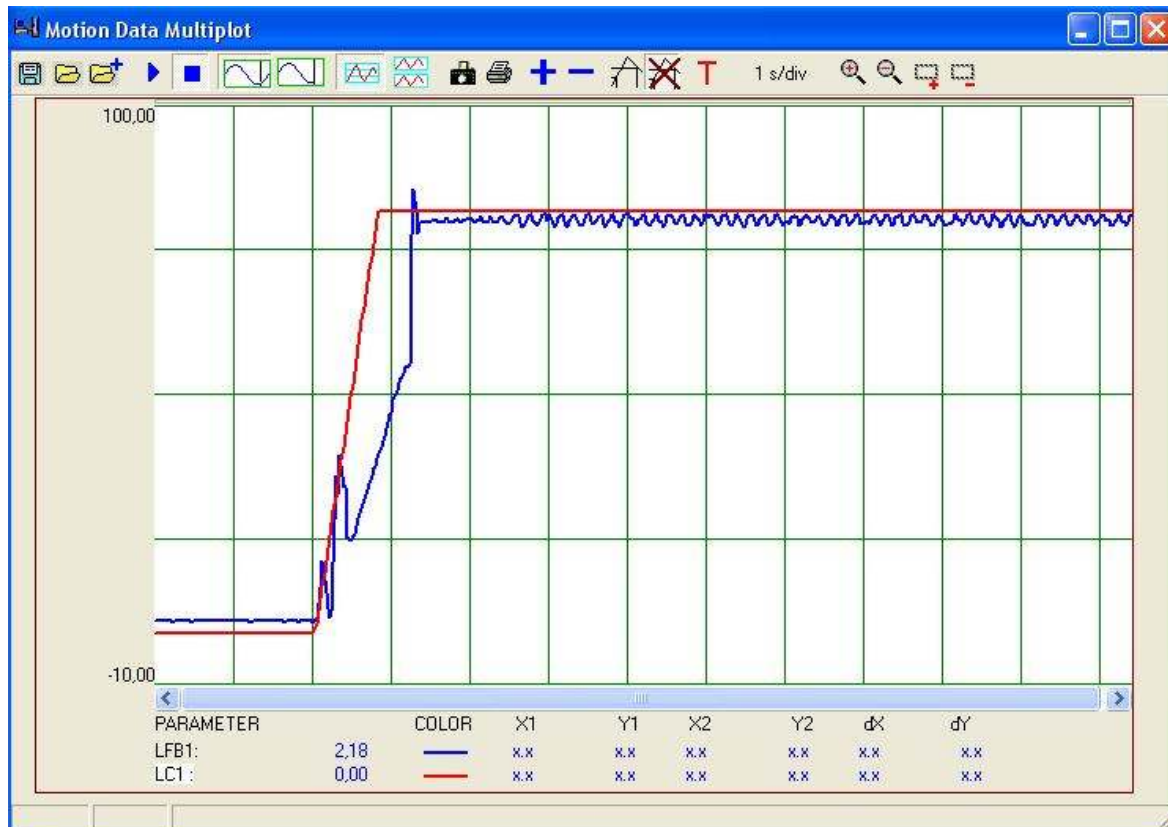


Obr. 32 Odezva na skok vyvolaná digitálním vstupem *DI5* binárním přepínačem (*binary call: 16*) při zesílení proporcionální složky $P = 0,15$

Jednotlivé odezvy na skoky válce jsem měřil z hodnoty tlaku 0 bar na tlak 80 bar při zesílení proporcionálního regulátoru 0,15; 0,55; a 1.



Obr. 33 Odezva vyvolaná deaktivací digitálního vstupu *DI5* binárním přepínačem (*binary call: 16*) při zesílení proporcionální složky $P = 0,15$



Obr. 34 Odezva na skok vyvolaná digitálním vstupem *DI5* binárním přepínačem (*binary call: 16*) při zesílení proporcionální složky $P = 1$



Obr. 35 Odezva vyvolaná deaktivací digitálního vstupu *DI5* binárním přepínačem (*binary call: 16*) při zesílení proporcionální složky $P = 1$

Z obr. 32, 34, je patrné, že nejrychleji na žádaný tlak reaguje válec při zesílení 1, rovněž při tomto zesílení dochází k překmitu skutečného tlaku (obr. 34), což je pro tlakovou regulaci nevhodné. Při tomto zesílení se již výrazně projevuje nulové překrytí hran šoupátka, kde vlivem dynamických účinků kapaliny dochází k jeho rozkmitání. Nejpomaleji válec reagoval při zesílení regulátoru 0,15, kdy zdaleka nedosahoval hodnoty žádaného tlaku (obr. 32). Proto je toto zesílení také nevhodné pro tlakové řízení.

Dalším výsledkem měření při změnách proporcionální složky P jsou odezvy válce (obr. 33, 35). Jednotlivé pohyby válce jsem měřil z tlaku 80 bar na tlak 0 bar. I zde je patrné, že s používaným typem proporcionálního regulačního ventilu nedocílím optimální tlakovou regulaci.

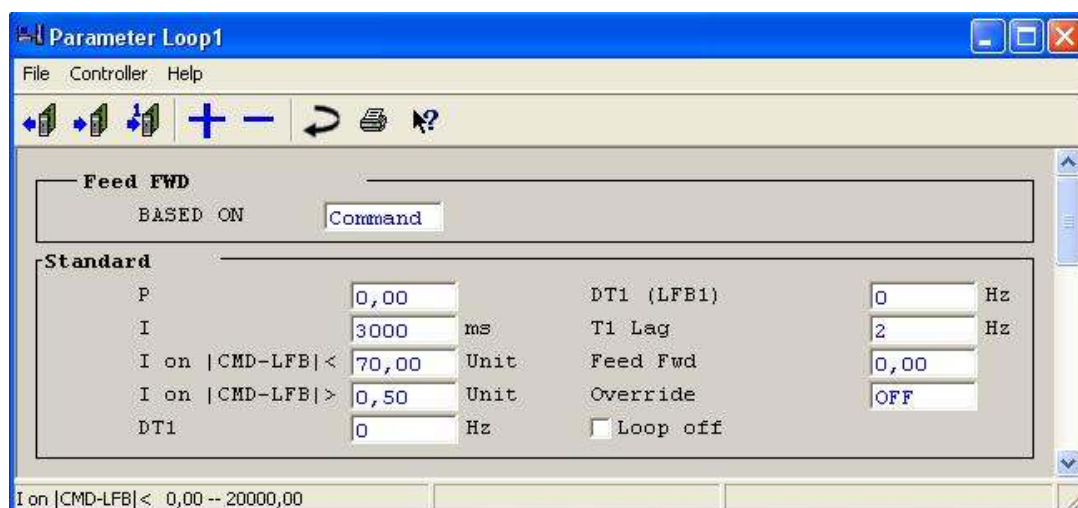
V příloze A 3 jsou uvedeny další výsledky měření.

4.2 Měření při změnách zesílení regulátoru I

Integračně působící regulátor vytváří časový integrál vstupní veličiny. V porovnání s regulátorem P není k regulační odchylce vytvořená akční veličina, ale časová změna akční veličiny. Integračně působící regulátor v principu zcela odstraní každou regulační odchylku tím, že i nejmenší vstupní signál narůstá s časem ve velký výstupní signál.

Vlivem působení vnějších sil na hydraulický systém může dojít ke změně žádané hodnoty a při nastavení malého zesílení P nedojde k navracení k žádané hodnotě, jak můžeme vidět na obr. 32. Proto integrační složka odstraňuje tyto chyby. V praxi se nejčastěji používá spínaná integrační složka v závislosti na rychlosti a přesnosti.

Integrační regulátor I jsem postupně nastavoval v bloku pro nastavení parametrů regulátorů smyčky 1 na jednotlivé hodnoty (obr. 36).



Obr. 36 Nastavení parametrů regulátoru smyčky 1

4.2.1 Výsledky měření při změnách zesílení regulátoru I

U integračního regulátoru I jsem nastavoval rychlost spínání na 3000 ms (obr. 36), horní mez spínání, při které regulátor začne působit pokud je regulační odchylka menší než 70, 50 a 40 Unit (bar) a spodní mez, při které začne regulátor působit pokud je regulační odchylka větší 0,5 Unit (bar). Dále interval časové konstanty na 2 Hz.

Na grafech (obr. 38, 39, 40) je vidět nežádoucí vychýlení skutečného signálu u všech tří měření, to je způsobeno typem proporcionálního regulačního ventilu a jeho šoupátkem, kde vlivem dynamických účinků proudu kapaliny je ovlivněna jeho poloha. Rovněž se zde projevuje nedostatečně silná středící pružina, která má tyto dynamické účinky proudu

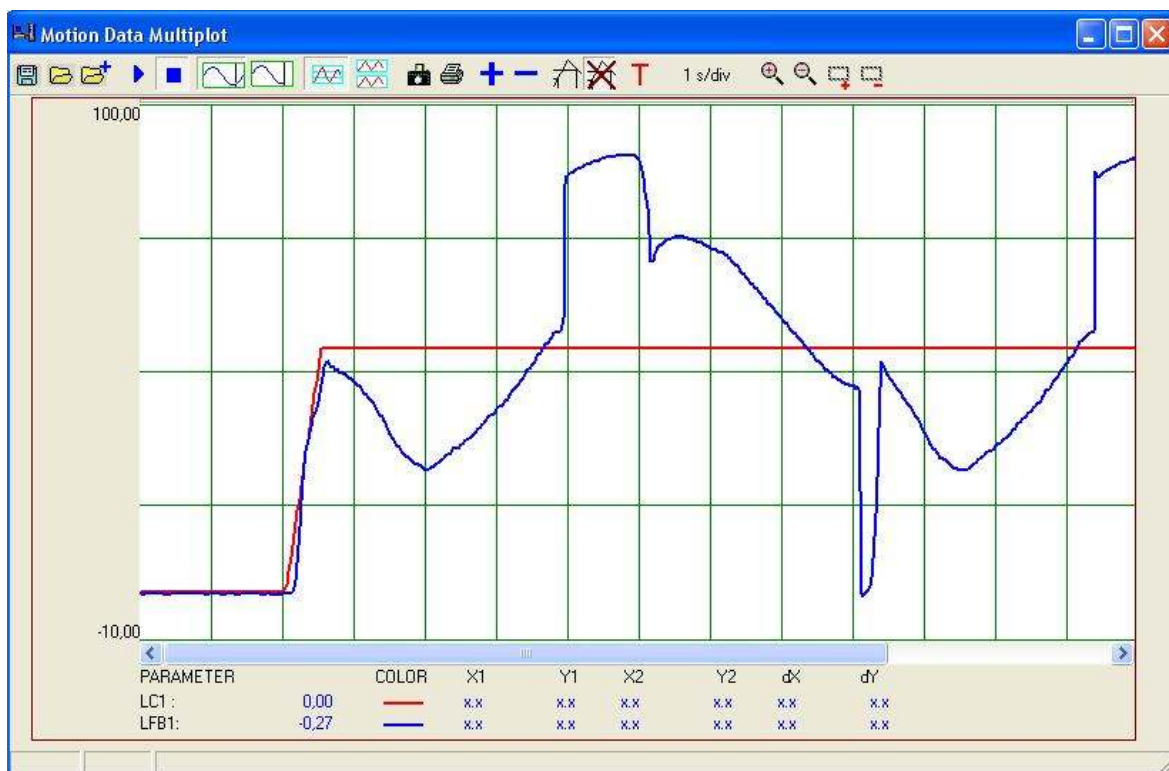
kapaliny eliminovat. Pro tlakovou regulaci se rovněž projevila nevhodnost používaného proporcionálního regulačního ventilu.



Obr. 38 Odezva při $I = 3000$ ms, $I_{on} (LCI - LFB1) < 70$ bar, $I_{on} (LCI - LFB1) > 0,5$ bar

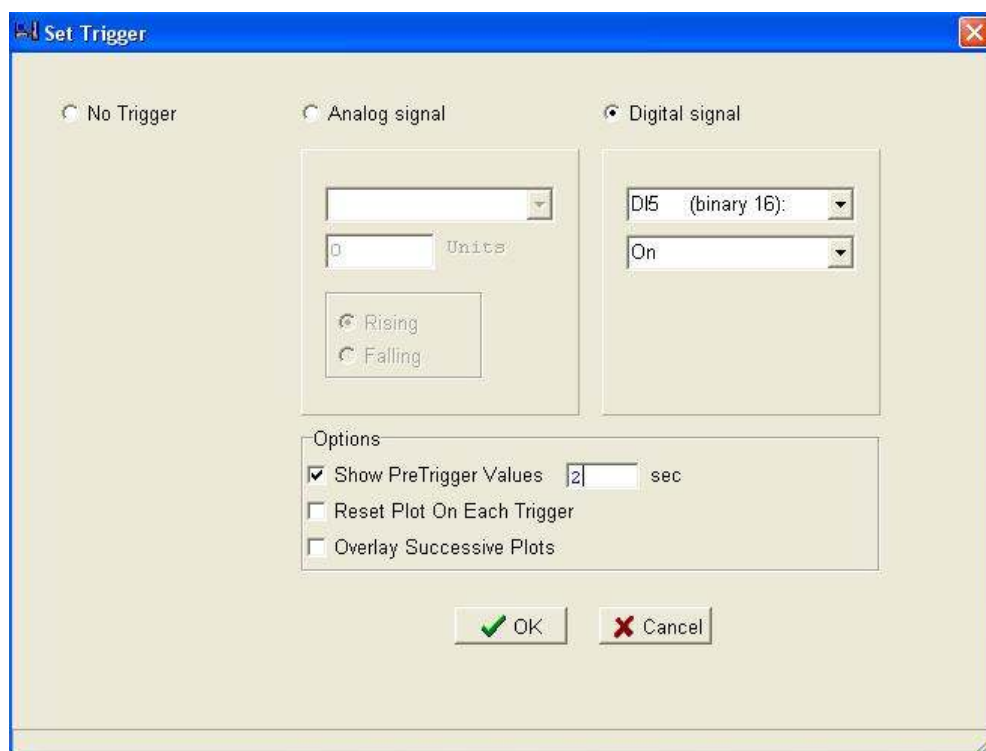


Obr. 39 Odezva při $I = 3000$ ms, $I_{on} (LCI - LFB1) < 50$ bar, $I_{on} (LCI - LFB1) > 0,5$ bar



Obr. 40 Odezva při $I = 3000$ ms, I on ($LC1 - LFB1$) < 40 bar, I on ($LC1 - LFB1$) > 0,5 bar

K tomu, aby všechna měření začínala ve stejném čase, nastavím v okně *Set Trigger* (obr. 41) spouštění měření na 2 s.

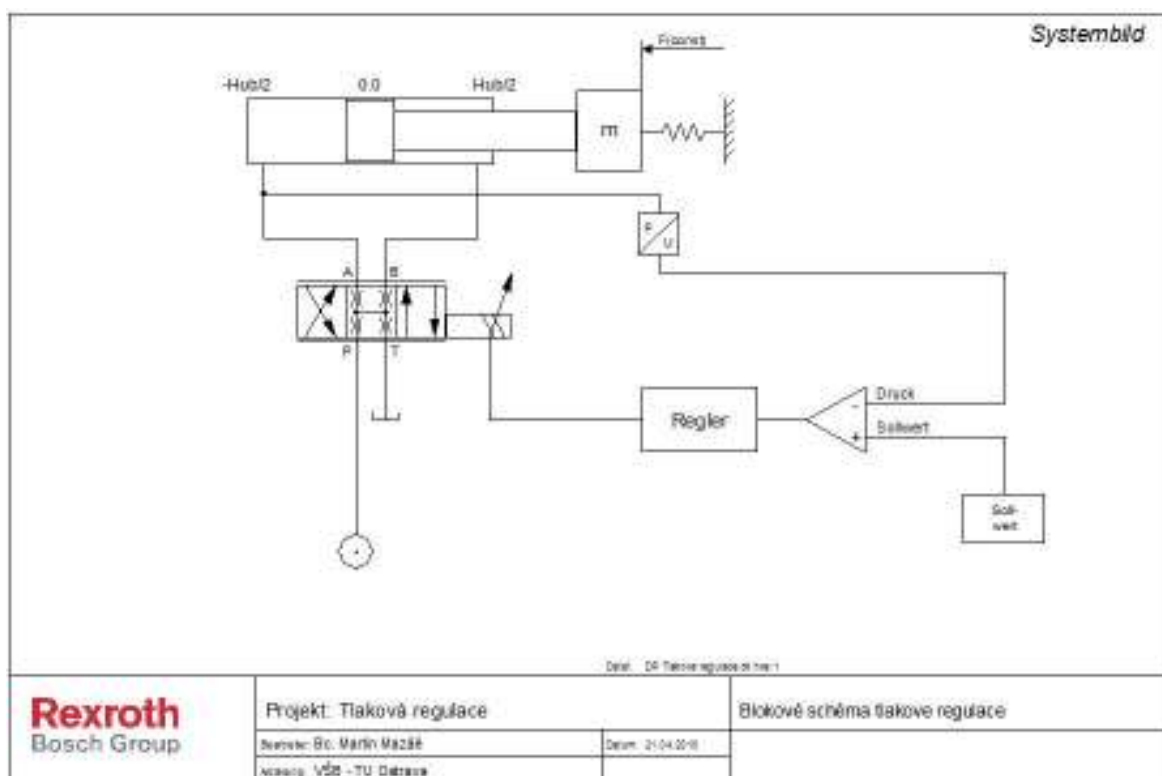


Obr. 41 Nastavení spouštění měření

5 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ S VÝSLEDKY SIMULACE

5.1 Simulační model regulačního obvodu v simulačním systému HYVOS 7.0

Hyvos 7.0, BoschRexroth je simulační systém pro hydraulické válcové pohony s ventilovým řízením. Umožňuje nelineární simulace elektrohydraulického regulačního pohonu, obsahuje knihovnu veškerých prvků BoschRexroth. Dále umožňuje volně navrhovat parametry komponentů.

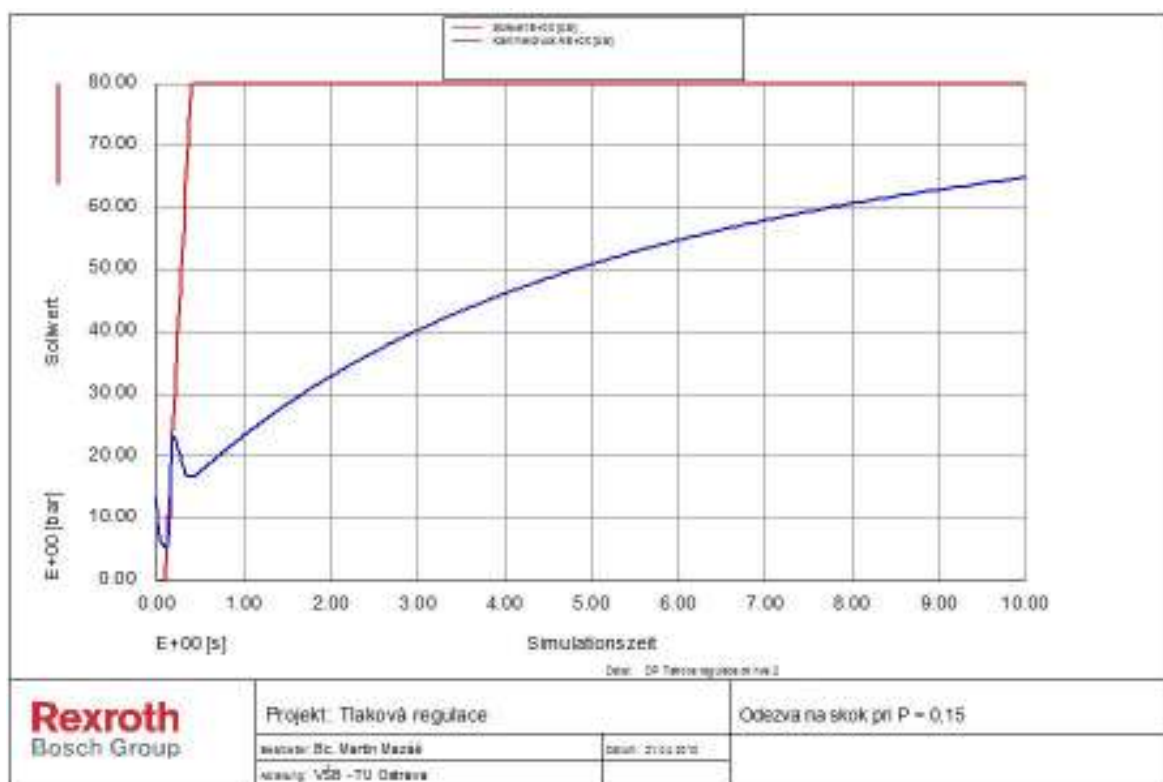


Obr. 42 Blokové schéma tlakové regulace v simulačním systému HYVOS 7.0

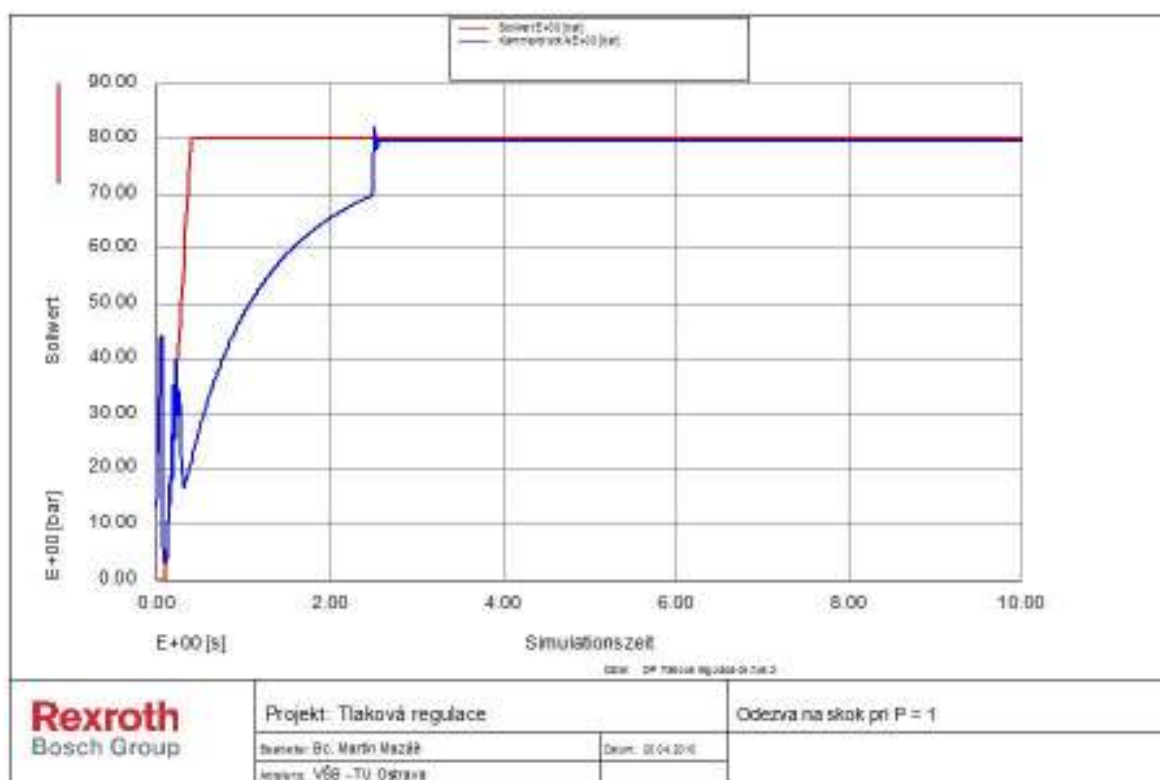
Pomocí simulačního systému HYVOS 7.0, BoschRexroth jsem zpracoval simulační model regulačního obvodu, který umožní porovnání naměřených výsledků s výsledky simulačními. V HYVOSU 7.0 jsem zpracoval tlakovou a také silovou regulaci.

$F (const)$ znázorňuje působení tíhové síly působící na válec při zatížení $30 \text{ kg} = 300 \text{ N}$ (obr. 42). Schématicky zobrazená pružina, představuje protisílu skutečných tlačných pružin instalovaných v laboratoři. Simulační systém HYVOS 7.0 umožňuje pouze nastavovat rozsah zdvihu válce \pm poloviční zdvih, proto v mém případě - Hub / 2 jsem nastavil na - 100 mm, což odpovídá zasunutí pístnice na 0 mm. Při simulaci jsem nastavil vstupní konstantní tlak 90 bar, abych se co nejvíce přiblížil skutečnosti. Přídavné parametry simulace (viskozita oleje, třecí síly, průsaky...) jsem zanedbal.

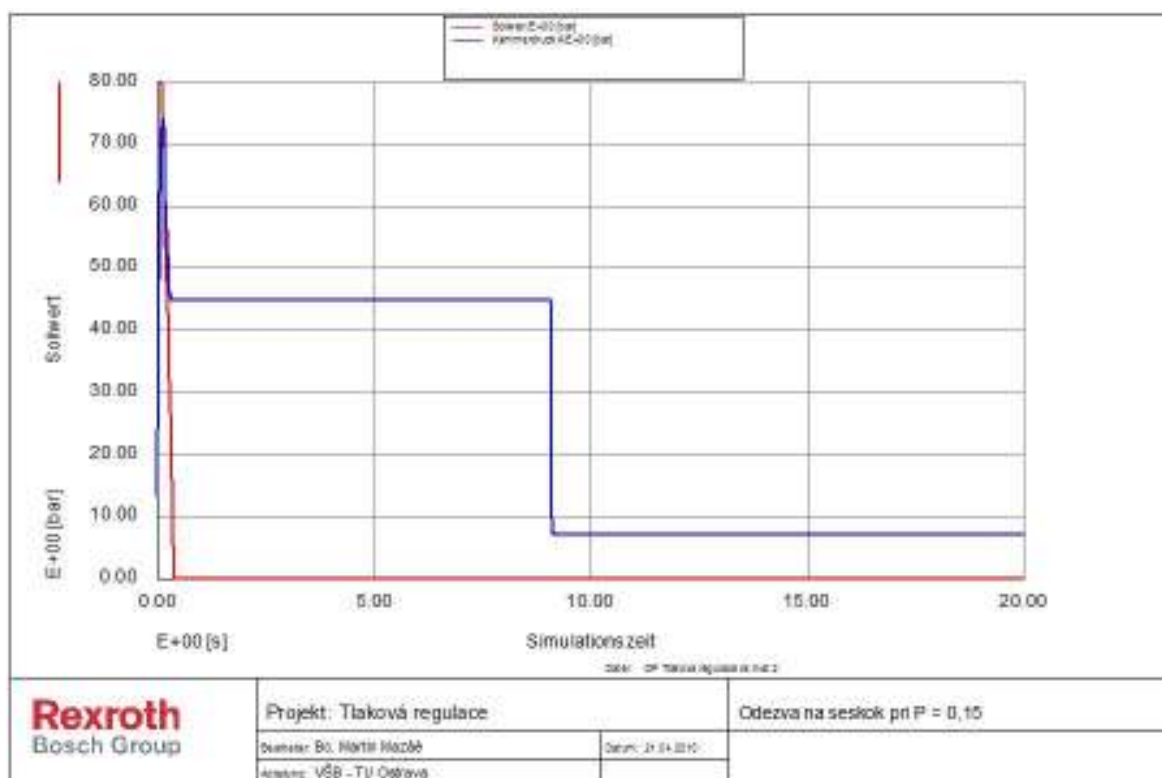
5.2 Výsledky simulace pro tlakovou regulaci se změnami parametrů P složky



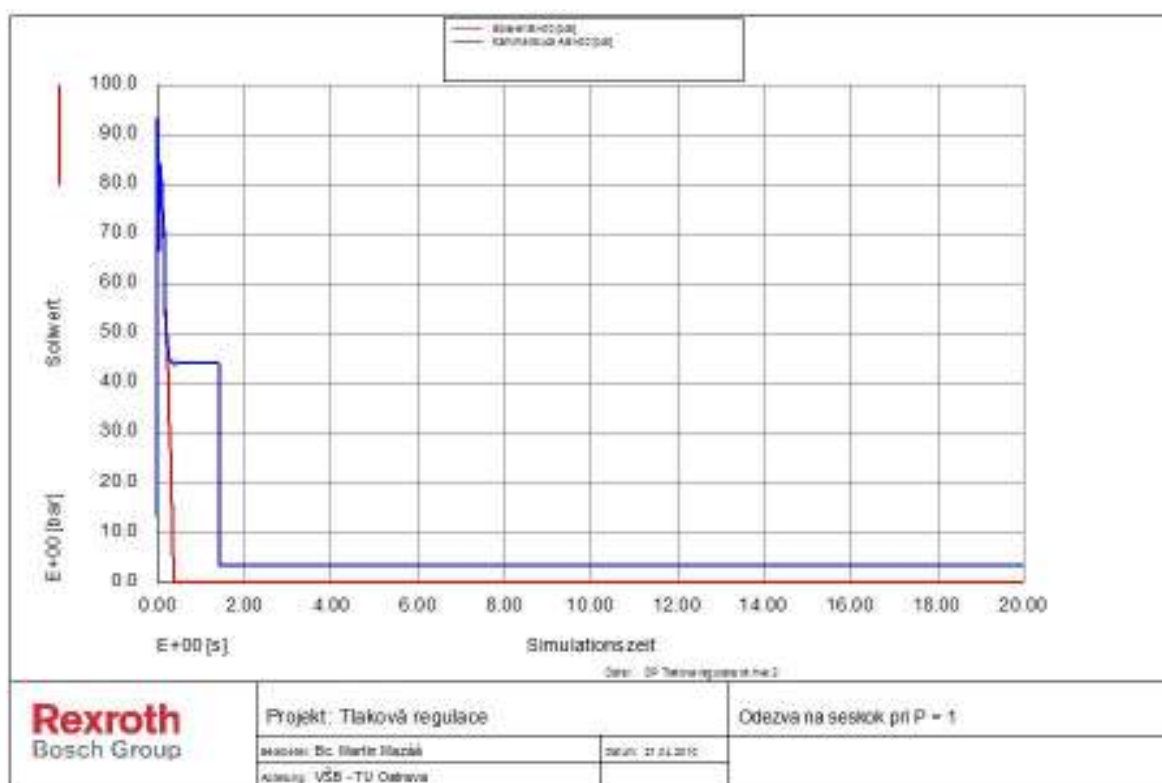
Obr. 43 Odezva na skok při $P = 0,15$



Obr. 44 Odezva na skok při $P = 1$



Obr. 45 Odezva při $P = 0,15$

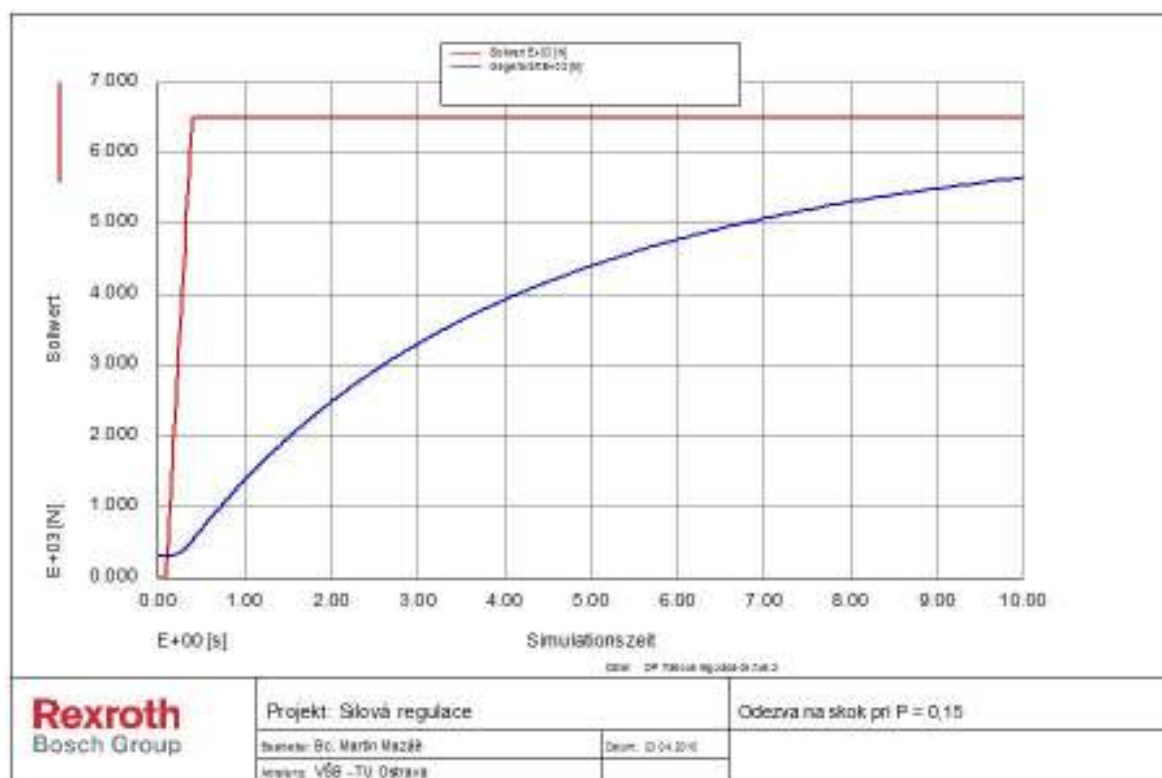


Obr. 46 Odezva při $P = 1$

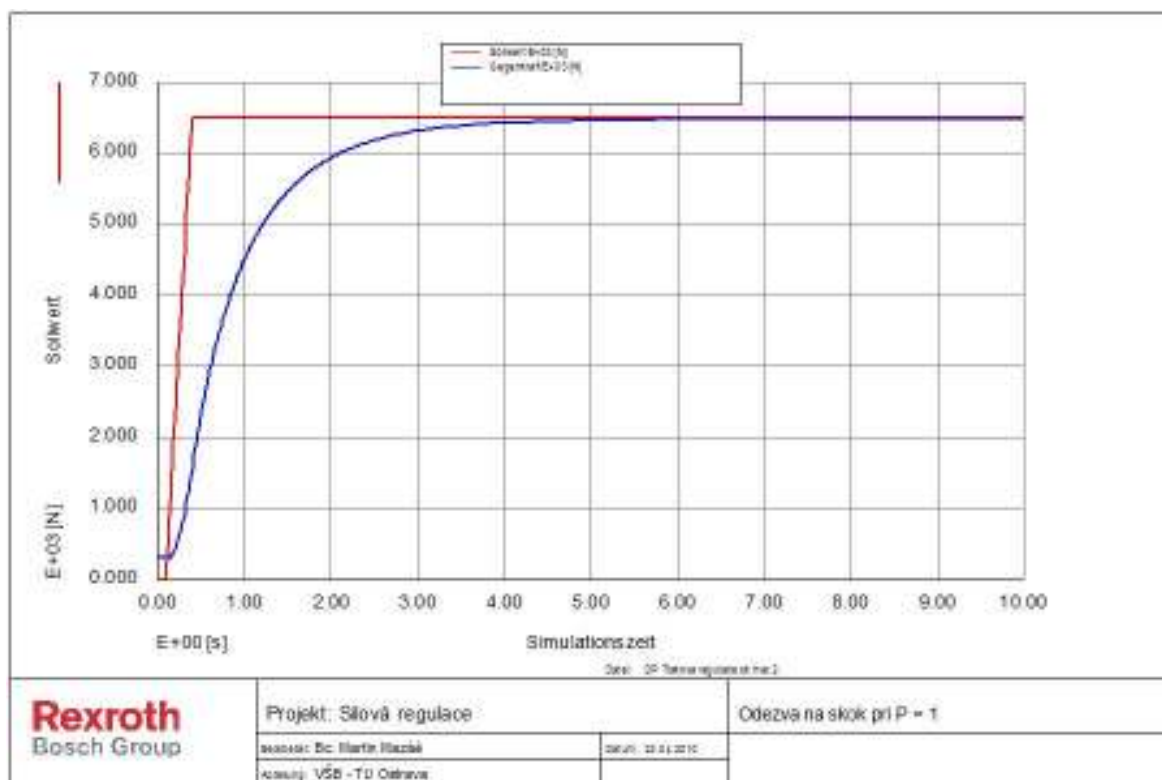
Z výsledků simulace se potvrdilo, že optimální tlakovou regulaci nedocílím s použitým proporcionálním regulačním ventilem (obr. 43, 44, 45, 46).

Další výsledky simulace tlakové regulace jsou uvedeny v příloze A 4.

5.3 Výsledky simulace pro silovou regulaci se změnami parametrů P složky



Obr. 47 Odezva na skok při $P = 0,15$



Obr. 48 Odezva na skok při $P = 1$

Blokové schéma silové regulace v simulačním systému HYVOS 7.0 je spolu s dalším výsledkem uvedeno v příloze A 5.

V této simulaci jsem docílil optimální silovou regulaci, a to při zesílení $P = 1$, kde skutečný signál dobře sleduje signál žádaný (obr. 48).

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh silové / tlakové regulace lineárního servopohonu, který je instalován v laboratoři katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení. Úkolem bylo sledování dynamického chování systému a navržení vhodného regulátoru pro řízení regulace síly/ tlaku.

Veškeré nastavování parametrů v programu BODAC 1.497 musí z bezpečnostních důvodů probíhat jen při vypnutém *enable* (přepínač aktivace karty) na ovládacím pultu.

V hydraulickém zařízení je používán hydraulický olej Baros 46 a tlak při měření 9 MPa. Dynamické chování systému značně ovlivňovala teplota oleje, která při tlakové regulaci rychle rostla. Z tohoto důvodu bych doporučoval zakoupit agregát s větším objemem nádrže popřípadě jej osadit chladičem.

Pro návrh hydraulického regulačního obvodu je výhodné použít simulační model, ten nám odhalí možné chyby návrhu, kterého se konstruktéři mohou dopustit.

Při porovnávání naměřených výsledků s výsledky simulace jsem došel k závěru, že naměřené grafy nejsou příliš odlišné od grafů simulace. Drobné rozdíly jsou způsobené simulačním systémem HYVOS 7.0, kde jsem neuvažoval viskozitu, tření a reálný stav hydraulických komponentů. Zároveň simulace potvrdila, že používaný proporcionální regulační ventil zde není vhodný k řízení tlaku. Pro dosažení optimální tlakové regulace bych doporučoval použít proporcionální rozváděč s negativním překrytím hran šoupátka popřípadě jiný typ regulačního ventilu. V simulačním systému HYVOS 7.0 jsem navrhnul optimální regulaci tlaku s přímo řízeným proporcionálním regulačním ventilem, typ 4WRSE NG 10 Q2 25 $dm^3 \cdot min^{-1}$, firmy BoschRexroth. V příloze A 7 jsou doložené výsledky simulace s tímto regulačním ventilem.

V simulačním systému HYVOS 7.0 jsem dále zpracoval silovou regulaci. Rozdíl mezi silovou a tlakovou regulací spočívá nejen v použitém snímači, kde při tlakové regulaci je využíván tlakový snímač a u silové regulace silový snímač, ale také v rozdílných hodnotách žádostí. Pro silovou regulaci je žádostí hodnota síly, kdežto u tlakové regulace se jedná o hodnotu tlaku. Z výsledků silové regulace se ukázalo, že s používaným proporcionálním regulačním ventilem docílím optimální silovou regulaci.

Při žádosti 0 V na ventil se projevil mírný posuv válce směrem dolů. Může to být způsobeno nedokonalým krytím šoupátka ventilu. V praxi se tento problém řeší použitím hydraulického zámku do obvodu.

Integrační složka regulátoru I se používá v případě častých rušivých vlivů působících na polohu válce. Měli bychom být opatrní u nastavování I složky, jenž může způsobit až destrukci zařízení. Do budoucna navrhuji vyzkoušet měřit skutečnou sílu pomocí dvou tlakových snímačů popř. diferenciální tlakovou regulaci.

Děkuji tímto za odborné vedení a rady Ing. Eriku Stonawskému, Ph.D. a doc. Ing. Bohuslavu Pavlokoví, CSc. za cennou pomoc v teoretické části této práce.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Götz, W. *Hydraulics. Theory and Application*. Ditzingen: OMEGON, 1998. 291 s. ISBN 3-9805925-3-7
- [2] JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1995. 152 s.
- [3] Kolektiv autorů. *Proporcionální technika a servotechnika*. Lohr am Main: Mannesmann Rexroth, 1986. ISBN 3-8023-0898-0.
- [4] KOPÁČEK, J.; PAVLOK, B. *Tekutinové mechanizmy*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1998. 156 s. ISBN 80-7078-238-2.
- [5] LEINVEBER, J.; VÁVRA, P.; ŘASA J. *Strojnické tabulky*. Praha: Scientia, 2000. 985 s. ISBN 80-7183-164-6.
- [6] PAVLOK, B. *Hydraulické prvky a systémy, Díl 1*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1999. 158 s. ISBN 80-7078-620-5.
- [7] PAVLOK, B. *Hydraulické prvky a systémy, Díl 2*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2008. 150 s. ISBN 978-80-248-1827-6.
- [8] PAVLOK, B.; SIVÁK, V. *Hydraulické mechanismy: příklady pro cvičení*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1980. 166 s.
- [9] PAVLOK, B.; SIVÁK, V. *Provoz a údržba hydraulických mechanismů*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1989. 93 s.
- [10] PIVOŇKA, J. a kolektiv. *Tekutinové mechanismy*. Praha: ČVUT Praha, 1987. 624 s.
- [11] PODEŠVA, J. *Dynamika v příkladech*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2005. 196 s. ISBN 80-7078-678-7.
- [12] RÝC, Z.; PAVLOK, B. *Hydraulické pohony a jejich regulace*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1984. 166 s.
- [13] SIVÁK, V. *Projektování hydraulických systémů*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 1990. 331 s. ISBN 80-7078-037-1.
- [14] SOUČEK, P. *Servomechanismy*. Praha: ČVUT Praha, 1982. 207 s.
- [15] VÍTEČKOVÁ, M; VÍTEČEK, A. *Základy automatické regulace*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2006. 200 s. ISBN 80-248-1068-9.

Firemní literatura

- [16] Dokumentace Hyvos 7.0, BoschRexroth (v němčině)
- [17] Dokumentace BODAC 1.497, BoschRexroth (v angličtině)
- [18] Interaktivní katalog systém 1.0, BoschRexroth (v angličtině)

- [19] Dokumentace k proporcionálnímu rozváděči D633, MOOG (v angličtině)
- [20] Dokumentace ke kartě VT - HACD, BoschRexroth (v angličtině)
- [21] Dokumentace k tlakovému snímači HM - 17, BoschRexroth (v angličtině)
- [22] Dokumentace k servopohonu
- [23] Příručka ovládacího pultu BoschRexroth
- [24] Katalog firmy BoschRexroth

Internetové odkazy

- [25] <http://www.boschrexroth.cz> (výrobní program a katalog firmy)
- [26] <http://www.ulbrich.cz> (výrobní program a katalog firmy)
- [27] <http://www.moog.com> (výrobní program a katalog firmy)
- [28] <http://www.balluff.cz> (výrobní program a katalog firmy)
- [29] <http://www.mitcalc.com> (výrobní program a katalog firmy)
- [30] <http://www.hennlich.cz> (výrobní program a katalog firmy)
- [31] <http://www.argo-hytos.com> (výrobní program a katalog firmy)
- [32] <http://www.olaer.cz> (výrobní program a katalog firmy)

8 SEZNAM PŘÍLOH

- A 1 Schéma hydraulického agregátu
- A 2 Schéma zapojení ovládacího pultu
- A 3 Výsledek měření při zesílení proporcionální složky $P = 0,55$
- A 4 Výsledek simulace tlakové regulace při zesílení proporcionální složky $P = 0,55$
- A 5 Blokové schéma silové regulace a výsledek při zesílení proporcionální složky $P = 0,55$
- A 6 Simulační data vytvořená v systému HYVOS 7.0
- A 7 Výsledky simulace optimální tlakové regulace
- A 8 Výkresová dokumentace mechanické části systému
- A 9 Příložené CD s obsahem diplomové práce, softwarem BODAC, verze 1.497 + nastavení digitální karty VT - HACD, příručka k servomechanismu - Postup nastavení polohové a tlakové regulace